

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Electrotechnique

N° :...../2023

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE: Sciences et Technologies

FILIERE: Electrotechnique

SPECIALITE: Réseaux Electriques

Thème

**Analyse de l'effet couronne dans les lignes
électriques haute tension.**

Présenté Par : Mr. Wail Sifour

Encadré Par : Pr. Mohammed Melit

Date de soutenance : 04/07/2023

Jury de Soutenance

Président : B. Harrat Grade MCA Univ MSB jijel

Encadreur : M. Mellit Grade Prof Univ MSB jijel

Examineur : S. Kaouche Grade MCB Univ MSB jijel

Promotion : 2022 /2023

Résumé

L'effet couronne est un phénomène spécifique dans les réseaux électriques, qui peut être observé dans les lignes de transmission. Dans les réseaux haute tension, l'effet couronne est beaucoup plus significatif que dans les systèmes de basse tension. La modélisation de l'effet couronne dans les lignes de transmission est une étape essentielle pour comprendre et atténuer ses effets indésirables. Elle permet de représenter mathématiquement les caractéristiques non linéaires de l'effet couronne et d'évaluer son impact sur les performances du réseau électrique. Plusieurs modèles mathématiques et physiques ont été développés dans la littérature. La majorité d'eux sont basés sur l'aspect macroscopique du phénomène et convergent vers le fait qu'il y a une augmentation de la capacité shunt de la ligne dès que la tension appliquée dépasse la tension critique d'apparition couronne. Les modèles utilisés peuvent varier, allant des modèles de circuit (analogiques) aux simulations numériques plus avancées (analytiques). L'objectif de notre travail de projet de fin d'études, consiste à la modélisation de l'effet couronne sur les lignes de transmission aérienne haute tension et l'analyse de l'impact des différents paramètres géométriques et physiques sur le phénomène. Nous examinons, ces effets par deux méthodes, la première c'est les caractéristiques «Q-V» ainsi que le calcul du rayon des coques couronne et la capacité dynamique. La deuxième c'est de l'implémentation des modèles couronne par FDTD en procédant par résolution d'un système d'équations $[A].[X]=[B]$.

Mots clé: Effet couronne, Lignes de transmission, Tension critique, FDTD, Modèles couronne, Capacité dynamique, Caractéristiques «Q-V».

Abstract

The corona effect is a specific phenomenon in electrical networks, which can be observed in transmission lines. In high voltage networks, the corona effect is much more significant than in low voltage systems. Corona effect modelling in transmission lines is an essential step in understanding and mitigating its adverse effects. It makes it possible to mathematically represent the non-linear characteristics of the corona effect and to evaluate its impact on the performance of the electricity grid. Several mathematical and physical models have been developed in the literature. The majority of them are based on the macroscopic aspect of the phenomenon and converge towards the fact that there is an increase in the shunt capacity of the line as soon as the applied voltage exceeds the critical voltage of appearance corona. The models used can vary from circuit models (analog) to more advanced numerical simulations (analytical). The objective of our final project work is to model the corona effect on the high voltage overhead transmission lines and to analysis the impact of the different geometric and physical parameters on the phenomenon. We examine these effects by two methods, the first being the characteristics «Q-V» as well as the calculation of the shell radius and the dynamic capacity. The second is the implementation of corona models by FDTD by proceeding by solving a system of equations $[A].[X]= [B]$.

Keywords: Corona Effect, Transmission Lines, Critical Voltage, FDTD, Corona Models, Dynamic Capacity, Characteristics «Q-V».

ملخص

التأثير الإكليلي هو ظاهرة محددة في الشبكات الكهربائية، والتي يمكن ملاحظتها في خطوط النقل. في شبكات الجهد العالي، يكون التأثير الإكليلي أكثر أهمية بكثير مما هو عليه في أنظمة الجهد المنخفض. تعد نمذجة تأثير التاج في خطوط النقل خطوة أساسية في فهم وتخفيف آثاره الضارة. إنه يجعل من الممكن تمثيل الخصائص غير الخطية لتأثير الهالة رياضيًا وتقييم تأثيرها على أداء شبكة الكهرباء. تم تطوير العديد من النماذج الرياضية والفيزيائية في الأدبيات. تستند غالبيتها إلى الجانب العياني للظاهرة وتتقارب مع حقيقة أن هناك زيادة في قدرة التحويل للخط بمجرد أن يتجاوز الجهد المطبق الجهد الحرج لإكليل المظهر. يمكن أن تختلف النماذج المستخدمة من نماذج الدائرة (التناظرية) إلى المحاكاة العددية الأكثر تقدمًا (التحليلية). الهدف من عملنا النهائي في المشروع هو نموذج التأثير الإكليلي على خطوط النقل العلوية للجهد العالي وتحليل تأثير البارامترات الهندسية والفيزيائية المختلفة على الظاهرة. نقوم بفحص هذه التأثيرات بطريقتين، الأولى هي الخصائص «Q-V» بالإضافة إلى حساب نصف قطر الغلاف والسعة الديناميكية. والثاني هو تنفيذ نماذج التاج بواسطة FDTD من خلال المضي قدمًا في حل نظام المعادلات $[A].[X] = [B]$.

الكلمات المفتاحية: تأثير التاج، خطوط النقل، الجهد الحرج، FDTD، نماذج التاج، السعة الديناميكية، الخصائص «Q-V».

Remerciements

Je remercie avant tout « ALLAH », tout puissant, de m'avoir donné la force pour suivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

*Je tiens, avant tout, à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrent **Pr : Mohammed Melit**, qui a été à l'origine de ce travail, pour sa patience, son professionnalisme, et sa confiance qu'il m'a témoignée, ainsi que ses conseils précieux et ses encouragements qui m'ont beaucoup aidé à mener bien la réalisation de ces travaux.*

*Je désire aussi remercier les professeurs de l'université de JIJEL, qui m'ont fourni des connaissances scientifiques nécessaires à la réussite de mes études universitaires « **Pr B. NEKHOUL, Pr M. MELIT, Dr S.***

***KAUCHE, Dr B. KHELIFI, Dr B. HARRAT, Pr N.
BOUDJERDA, Dr B. MAKHLOUF, ... ».***

*Je tiens à dire particulièrement un grand merci à toute
ma famille. Enfin à tous ceux ; qui de près ou de loin ont
rendu ce travail possible.*

Merci à tous.

Dédicaces

Je dédie ce travail, A

*Mes très ‘chers parents’ Que Dieu leur accorde longue
vie,*

Toute ‘ma famille’ sans exception,

*Tous ‘mes amis’ et ‘mes collègues’ chacun à son
noms,*

Tous ceux qui m’ont aidé durant ma vie universitaire,

*A tous ‘mes enseignants’ Du département
d’électrotechnique de l’université de Jijel Plus
particulièrement l’équipe réseaux.*

Sifour Wail

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I Généralités sur l'effet couronne dans le réseau électrique

I. Introduction.....	3
II. Réseau électrique.....	3
II.1. Architecture des réseaux électriques.....	3
II.2. Constitution d'un réseau électrique.....	4
II.2.1. Lignes électriques.....	4
II.2.1.1. Lignes aériennes.....	5
II.2.1.2. Lignes souterraines.....	5
II.2.1.3. Câbles de garde.....	6
II.2.2. Postes électriques.....	7
III. Les surtensions.....	8
III.1. Surtensions atmosphériques (surtensions de foudre).....	8
III.1.1. Classification des coups de foudre.....	9
III.2. Surtension de manœuvre.....	10
III.3. Surtension à fréquence industrielle.....	10
III.4. Surtension par Ferro-résonance.....	10
IV. Effet couronne et processus de la décharge couronne.....	10
IV.1. Définition de l'effet couronne.....	10
IV.2. Mécanisme de la décharge couronne.....	11
IV.3. Avalanche électronique – streamer.....	11
IV.3.1. La décharge de Townsend.....	11
IV.3.2. Théorie des streamers.....	12
IV.4. Modes d'émission des charges.....	13
IV.4.1 Aigrettes négatives (impulsion de TRICHEL).....	13
IV.4.2. Zone de conductivité d'HEMERSTEIN.....	13

IV.4.3. Aigrettes positives.....	14
V. Différents régimes de la décharge (caractéristique courant-tension)	14
VI. Modes de décharge par effet couronne	15
VI.1.Effet couronne en tension continue positive.....	15
VI.2. Effet couronne en tension continue négative.....	16
VI.3. Effet couronne en tension alternative	16
VII. Champ et tension électrique d'apparition de l'effet couronne.....	17
VII.1. Loi de Peeck -seuil critique de l'effet couronne	17
VIII. Utilisation et conséquences de l'effet couronne.....	18
VIII.1. Utilisation de l'effet couronne.....	18
VIII.2. Conséquences positives de l'effet couronne.....	18
VIII.3. Conséquences négatives de l'effet couronne.....	18
VIII.3.1. Pertes d'énergie.....	19
VIII.3.2. Interférences radio - télévision.....	19
VIII.3.3. Bruit audible.....	19
VIII.3.4. Vent ionique	20
VIII.3.5. Vibrations mécaniques des conducteurs	20
VIII.3.6. Production d'ozone et des oxydants.....	20
IX. Applications utilisant la décharge couronne	20
IX.1. Paratonnerre.....	20
IX.2. Neutralisation.....	21
IX.3. Filtre électrostatique	21
IX.4. Séparateur électrostatique.....	21
X. Avantage de la décharge couronne dans le réseau	22
XI. Réduction de l'effet couronne sur les lignes électriques.....	22
XI.1. Utilisation de conducteurs de gros diamètre.....	23
XI.2. Utilisation de faisceau de conducteurs	23
Références bibliographiques	25

Chapitre II Modélisation de la décharge couronne dans le réseau électrique

I. Introduction.....	27
II. Modélisation des lignes électriques	27
II.1. Paramètres linéiques d'une ligne aérienne dont le retour s'effectue par le sol.....	27
II.1.1. Paramètres linéiques longitudinaux	27
II.1.2. Paramètres linéiques transversaux	29
II.2. Modélisation de la réponse temporelle d'un réseau électrique par FDTD	29
II.2.1. Equations des lignes en temporel.....	30
II.2.2. Discrétisation par FDTD des équations des lignes à constantes réparties	31
II.2.3. Représentation quadripolaire d'une ligne dans le domaine temporel.....	33
II.2.4. Définition du vecteur inconnu $[X]$	34
III. Modélisation de l'effet couronne.....	34
III.1. Caractéristiques générales de la décharge couronne Q-V	35
III.2. Différents modèles de l'effet couronne	36
III.2.1. Modèles analogiques	36
III.2.2. Modèles analytiques	40
III.2.2.1. Modèles statiques	40
III.2.2.2. Modèles dynamiques	41
Références bibliographiques	44

Chapitre III Applications et discussions des résultats

I. Introduction.....	46
II. Validation et discussion des résultats	46
II.1. Caractéristique charge – tension (Q-V).....	48
III. Etude paramétrique.....	50
III.1. Effet de front d'onde.....	50
III.1.1. Calcul des coques de charge	50
III.1.2. Calcul de la variation de la capacité couronne.....	51
III.1.3. Calcul du rayon des coques couronne.....	51
III.2. Effet de la hauteur h	52

III.2.1. Calcul des coques de charge	52
III.2.2. Calcul de la variation de la capacité couronne.....	52
III.2.3. Calcul de rayon des coques couronne	53
III.3. Effet du rayon de conducteur.....	53
III.3.1. Calcul des coques de charge	53
III.3.2. Calcul de la variation de la capacité couronne.....	54
III.3.3. Calcul de rayon des coques couronne	55
IV. Implémentation des modèles couronne par FDTD	55
IV.1. Validation	55
IV.2. Cas d'absence de l'effet couronne.....	56
IV.3. Cas de présence de l'effet couronne	58
V. Etude paramétrique.....	59
V.1. Effet de la conductivité du sol	60
V.2. Effet du rayon r_0	61
V.3. Effet de la hauteur du conducteur au sol h	62
V.4. Effet de front d'onde.....	63
VI. Analyse et discussion des résultats.....	64
VII. Conclusion	65
Références bibliographiques	66
Conclusion générale	67

Introduction Générale

Introduction générale

L'effet couronne ou « corona effect » (en notation anglo saxonne) a attiré l'attention des chercheurs notamment par les phénomènes lumineux ayant lieu. Rappelons que ce phénomène, maintenant très bien connu qui se manifeste sous forme d'une gaine lumineuse qui apparaît autour d'un fil mince, lorsque celui-ci est porté à un potentiel suffisamment élevé. C'est à R. W. Peek a qui revient la première étude sur l'effet couronne. Celui-ci qui, vers 1920 a établi une loi empirique exprimant le seuil d'apparition de la lueur, en termes de champ électrique superficiel. Cette loi qui est encore en usage. De là une grande étape a été franchie et des travaux ne cessent de s'effectuer sur la compréhension du phénomène physique lui-même et sur les moyens de détermination de ses paramètres électriques à savoir le champ, le courant, la charge, ...etc. Cependant, la maîtrise du phénomène permet le dimensionnement des lignes et des postes électrique THT et HT du fait qu'il mène à l'amorçage de tout l'intervalle d'isolement.

Le réseau électrique de par son étendu est soumis aux surtensions d'origine atmosphérique (coups de foudres) qui se propagent le long de la ligne de transmission jusqu' aux postes de transformations. Ces surtensions subissent des atténuations et des déformations causées par l'effet couronne qui apparaît sur les conducteurs des lignes de transmission lorsque la tension dépasse un seuil critique appelée tension d'apparition couronne.

En pratique, il est fréquemment nécessaire de prendre en compte l'effet couronne, car il introduit une non-linéarité distribuée dans les lignes de transmission. Bien que la propagation des ondes sur ces lignes en présence de l'effet couronne ait été étudiée depuis un certain temps, les progrès ont été lents et il reste encore beaucoup de phénomènes à éclaircir afin de maîtriser la coordination des isolements.

Étant donné la complexité et les contraintes liées aux expériences en laboratoire à haute tension, la nécessité de gagner du temps et l'argent et ainsi que la préservation de la sécurité des équipements et des éléments utilisés, la simulation de modèles analogiques de circuits et analytiques semble une très bonne alternative pour apporter quelques éclaircissements. Ces modèles sont basés sur les caractéristiques de charge en fonction de la tension mesurée expérimentalement, représentées sous forme de courbes «Q-V». Ces simulations permettent d'obtenir des résultats similaires/comparables à ceux obtenus en laboratoire sans avoir à effectuer

des expériences réelles à haute tension.

L'objectif de notre travail consiste à la modélisation de l'effet couronne sur les lignes de transmission aérienne THT/HT et l'analyse de l'impact des différents paramètres géométriques et physiques sur le phénomène. Notre mémoire de fin d'études est subdivisé en trois parties sous forme de chapitres. Dont la première est consacrée aux généralités, nous commençons par un rappel sur les différents composants du réseau électrique, à savoir l'architecture des réseaux électriques, lignes électriques, postes électriques ainsi que les surtensions,...etc. Ainsi qu'une brève présentation sur le phénomène de l'effet couronne et ses différents effets, nous présenterons aussi les différents modes de décharge couronne et son processus d'apparition. Enfin nous présenterons les avantages et les conséquences de l'effet couronne.

Dans le deuxième chapitre nous nous intéressons à la modélisation des lignes électriques par le calcul des paramètres linéiques (longitudinaux et transversaux) d'une ligne aérienne et la modélisation de la réponse temporelle d'un réseau électrique par FDTD en procédant par résolution d'un système d'équations $[A].[X]= [B]$. Nous complétons cet exposé théorique par la modélisation du phénomène couronne et son implémentation dans les équations des lignes par FDTD. En particulier, Nous focalisons notre travail sur les modèles analogiques et analytiques développés par plusieurs chercheurs et disponibles dans la littérature.

Le troisième et dernier chapitre nous le consacrons aux applications afin de valider les concepts théoriques que nous avons exposés. Ce chapitre sera organisé en différentes parties, Nous débutons par une validation par comparaison de nos résultats avec ceux de la littérature puis nous proposons une étude paramétrique sur l'effet de la résistivité du sol, la hauteur, le rayon ainsi que la raideur du front d'onde.

Nous examinons ensuite, ces effets par deux méthodes, la première c'est les caractéristiques «Q-V» ainsi que le calcul du rayon des coques couronne et la capacité dynamique. La deuxième c'est de l'implémentation des modèles couronne par FDTD. Notre étude sera terminée par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

Généralités sur l'effet couronne dans le réseau électrique

I. Introduction

Avec le développement des réseaux électriques et la répartition inégale des ressources l'énergie dans le monde, les lignes de transmission à haute tension sont construites pour transporter l'énergie vers les consommateurs, sous l'effet des surtensions dues à la foudre ou les opérations de manœuvre, les défauts des lignes de transmission s'accompagnent souvent de décharges couronne.

L'une des conséquences indésirables de la transmission d'énergie électrique à des niveaux de tension élevés est l'apparition de l'effet couronne. Ce phénomène se manifeste sous la forme d'une gaine incandescente qui apparaît autour des conducteurs de ligne lorsque ces conducteurs sont portés à une tension suffisamment élevée dès que le champ électrique dépasse le seuil auquel se produit l'effet couronne.

L'appellation « effet couronne » vient du fait qu'autour d'un fil apparaît, à partir d'une certaine valeur du potentiel, une gaine lumineuse bleu-violet dont l'épaisseur augmente avec la tension.

Le paramètre principal régissant l'amplitude du phénomène couronne est le champ électrique à la surface du conducteur qui dépend du diamètre et l'état de surface du conducteur, la densité de l'air environnant, la pluie, la pollution, l'humidité, etc...

II. Réseau électrique

Le terme "réseau électrique" désigne l'ensemble des infrastructures utilisées pour transporter l'énergie électrique des centrales de production vers les consommateurs d'électricité.

Ce réseau est composé de lignes électriques qui représentent les artères du réseau électrique, ils fonctionnent à différents niveaux de tension qui peuvent être aériennes, souterraines ou sous-marines. Ces lignes sont interconnectées dans des postes électriques. Les postes électriques constituent les nœuds ; ils jouent un rôle essentiel en permettant la répartition, la distribution de l'électricité et la conversion de la tension grâce à l'utilisation de transformateurs.

II.1. Architecture des réseaux électriques

L'architecture d'un réseau électrique peut varier en fonction de la taille, de la complexité et de l'emplacement du système électrique. Cependant, la plupart des réseaux électriques suivent une architecture de base:

- **Réseau de grand transport** : Ce type de réseau assure le transport de l'électricité à haute tension sur des longues distances, souvent sur des pylônes électriques ou des câbles souterrains. Leur structure est généralement maillée.
- **Réseau de répartition** : les centres de production se situent généralement loin des consommateurs, ils accompagnent la disponibilité des ressources primaires (l'eau, le vent, le gaz et...). Ce type de réseau est alors indispensable pour assurer une répartition de l'énergie proche des grandes régions consommatrices de l'électricité. Ils sont généralement de structure bouclée afin d'assurer une très haute sécurité d'alimentation.
- **Réseau de distribution** : les réseaux de distribution assurent l'approvisionnement en électricité à moyenne et basse tension pour les agglomérations et les zones d'activités afin de l'acheminer vers les bâtiments résidentiels, commerciaux et industriels. Ils sont souvent composés de câbles aériens ou souterrains, ainsi que des transformateurs de distribution pour réduire davantage le niveau de tension. Ce type de réseau est généralement de structure radiale ou arborescente.

Cette architecture de base peut varier en fonction de la taille et de la complexité du réseau électrique, ainsi que des spécificités de chaque pays ou région.

II.2. Constitution d'un réseau électrique

II.2.1. Lignes électriques : est un ensemble de câbles et/ou de pylônes en métal ou en béton reliés par des conducteurs électriques qui permettent de transporter l'électricité sur de longues ou des courtes distances [I.1].

Il existe plusieurs types de lignes électriques dans les réseaux électriques, qui sont déterminées en fonction des besoins de chaque système et de chaque application. Les tensions les plus courantes sont les suivantes :

- **Basse Tension (BT)** : la basse tension est utilisée pour les réseaux de distribution qui alimentent les bâtiments résidentiels et commerciaux.
- **Moyenne Tension (MT)** : la moyenne tension est utilisée pour les réseaux de distribution qui alimentent les bâtiments industriels et les zones rurales. La tension standard pour les réseaux de moyenne tension est de 10 000 à 36 000 volts.

- **Haute Tension (HT)** : la haute tension est utilisée pour la transmission d'électricité sur de longues distances. La tension standard pour les réseaux de haute tension est de 110 000 à 400 000 volts.
- **Très Haute Tension (THT)** : la très haute tension est utilisée pour la transmission d'électricité sur de très longues distances, par exemple pour les interconnexions entre les réseaux électriques de différents pays. La tension standard pour les réseaux de très haute tension est de 400 000 à 800 000 volts.

II.2.1.1. Lignes aériennes

Une ligne électrique aérienne est un ensemble de pylônes (en métal ou en béton), et conducteurs qui permettent de transporter l'énergie électrique (figure I.1) [I.1].



Figure I.1. Lignes électriques aériennes.

Les lignes électriques aériennes sont souvent utilisées pour transporter l'électricité produite par les centrales électriques vers les consommateurs situés à distance, tels que les villes ou les industries. Ces lignes peuvent être exploitées en THT, HT, MT et BT), en fonction de la quantité d'électricité transportée et de la distance à parcourir. Les lignes électriques aériennes sont un élément clé de l'infrastructure électrique et sont essentielles pour fournir de l'électricité à grande échelle.

II.2.1.2. Lignes souterraines

Une ligne électrique souterraine est un ensemble de câbles électriques placés sous terre qui permettent de transporter l'électricité sur de courtes à moyennes distances, généralement dans les zones urbaines ou les zones densément peuplées. Contrairement aux lignes électriques aériennes,

les lignes souterraines sont enfouies sous terre pour des raisons esthétiques et de sécurité, et pour minimiser les pertes d'énergie. Les câbles utilisés pour les lignes électriques souterraines sont souvent isolés et protégés contre l'humidité, les chocs mécaniques et les interférences électromagnétiques.



Figure I.2. Lignes électriques souterraines.

II.2.1.3. Câbles de garde

Les câbles de garde ne sont pas alimentés par des courants de phase. Ils sont situés au-dessus des conducteurs de phase des lignes aériennes HT et THT. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, leur disposition géométrique permet d'éviter le foudroiement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en acier.

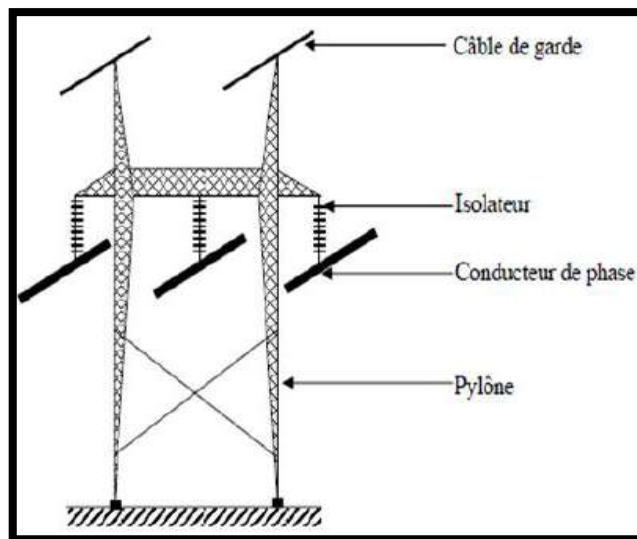


Figure I.3. Schémas simplifié d'un pylône électrique THT.

II.2.2. Postes électriques

Les postes électriques sont des éléments principaux du réseau électrique. Ils reçoivent l'énergie électrique, la transforment (en passant d'un niveau de tension à une autre) et la répartissent (en assurant la jonction des différents réseaux électriques), mais aussi à aiguiller l'électricité et à la "surveiller" à distance sur les différentes lignes qu'elle emprunte.

On y trouve un certain nombre d'appareils électriques (transformateurs, disjoncteurs, sectionneurs...) qui participent au bon fonctionnement du réseau.

II.2.2.1. Types des postes électriques

Il existe trois grandes catégories de postes électriques :

➤ **Les postes de transformation (poste source)**

Les postes de transformation permettent de passer d'un niveau de tension d'entrée donné à un niveau de tension de sortie qui peut être supérieur (on parle alors de transformateurs éleveurs) ou inférieur (abaisseur).

➤ **Les postes d'interconnexion**

Qui comprennent à cet effet un ou plusieurs points communs triphasés appelés jeu de barres, sur lesquels différents départs (lignes, transformateurs, etc.) de même tension peuvent être aiguillés.

➤ **Les postes mixtes**

Les postes mixtes les plus fréquents, qui assurent une fonction dans le réseau d'interconnexion et qui comportent en outre un ou plusieurs étages de transformation.

➤ **Les postes de distribution**

Le but est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels.

III. Les surtensions

Une surtension se produit lorsqu'il y a une tension excessive entre un conducteur de phase et la terre, ou entre conducteurs de phases, dépassant ainsi la valeur maximale de tension correspondant à l'équipement le plus sensible.

On distingue deux types de surtensions : les surtensions de mode différentiel, qui surviennent entre conducteurs de phases, et les surtensions de mode commun, qui se produisent entre un conducteur de phase et la masse ou la terre. Les surtensions peuvent être causées par diverses sources, notamment :

- Les phénomènes atmosphériques tels que *les coups de foudre*.
- Les commutations de manœuvre.
- Les décharges électrostatiques telles que *l'effet couronne*.
- Les surtensions à fréquence industrielle.

Le tableau I.1 montre les caractéristiques de différentes surtensions.

Types de surtension	Durée	Raideur de front de Montée ou fréquence	Amortissement en fonction de la distance
Les phénomènes atmosphériques	Très courte (μs)	Très élevée ($1000 \text{ kV}/\mu s$)	Fort
Décharge Electrostatique	Très courte (ns)	Elevée ($\approx 10 \text{ MHz}$)	Très fort
Manœuvres	Courte (ms)	Moyenne ($1 \text{ à } 200 \text{ kHz}$)	Moyenne
A fréquence industrielle	Longue (s)	Fréquence du réseau	Faible

Tableau I.1. Caractéristiques des différents types de surtensions [I.2].

III.1. Surtensions atmosphériques (surtensions de foudre)

La foudre est un phénomène naturel apparaissant en cas d'orage, elle résulte de la décharge électrique entre un nuage et le sol ou entre deux nuages.

Le phénomène physique de la foudre correspond à une source de courant impulsionnel, à savoir une suite de décharge d'une quantité d'électricité sur un court intervalle de temps (de $1\mu s$ à $10\mu s$).

III.1.1. Classification des coups de foudre

Un coup de foudre entre nuage et terre, comprend deux grandes phases principales :

- Le développement d'un pré-décharge de foudre (ou traceur) non visible.
- L'amorçage d'un arc (éclair) empruntant le canal ionisé de la pré-décharge.

On distingue (figure I.4):

- **Un coup de foudre descendant** : Développement du traceur depuis les nuages vers le sol.
- **Un coup de foudre ascendant** : Développement du traceur depuis le sol vers les nuages.
- **Un coup de foudre négatif** : Lorsque la partie négative du nuage se décharge (80% des cas en pays tempérés).
- **Un coup de foudre positif** : Lorsque la partie positive du nuage se décharge. Une particularité des coups de foudre et leur polarisation, ils sont généralement négatifs (nuage négatif et sol positif) [I.3].

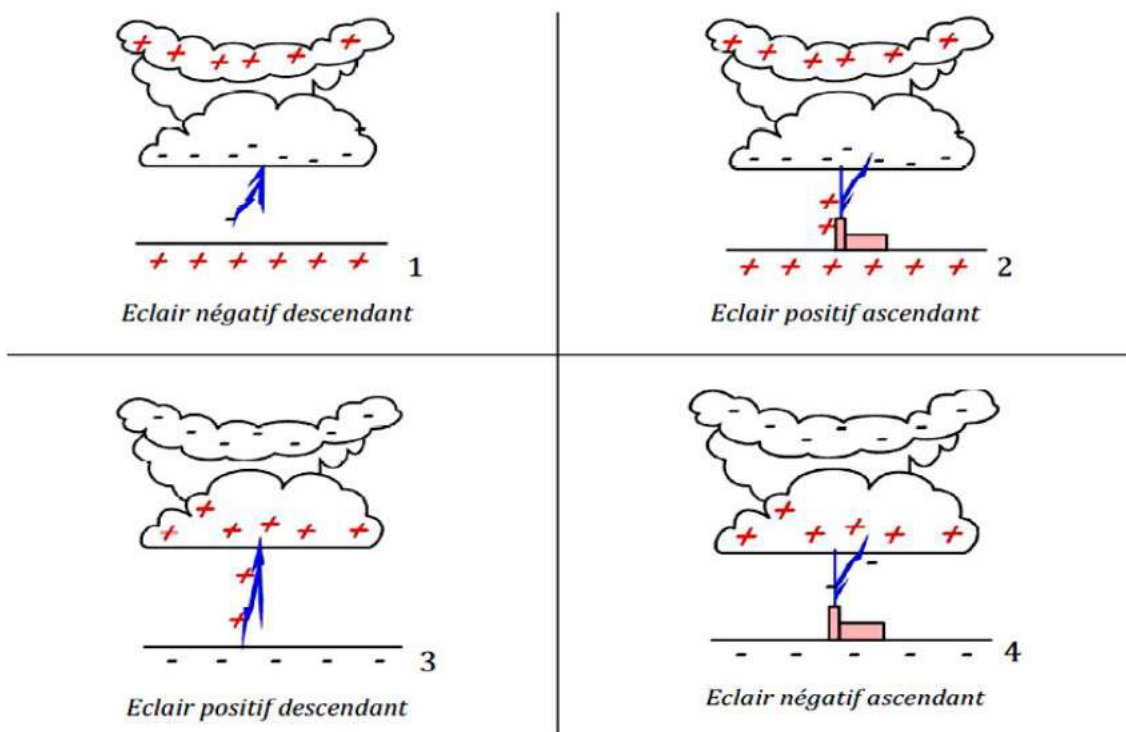


Figure I.4. Les quatre types de décharges de foudre au sol.

III.2. Surtension de manœuvre

Elles sont provoquées par des modifications rapides de la structure du réseau (ouverture d'appareils de protection ...). Des surtensions transitoires peuvent apparaître lors de la mise hors circuit d'une charge inductive telle que: transformateur à vide, inductances, ou inductances alimentées par un transformateur, et cela même lorsque le courant à couper n'excède pas une centaine d'ampères.

III.3. Surtension à fréquence industrielle

Les surtensions à fréquences industrielles (50 Hz ou 60 Hz) sont causées très souvent par:

- Un défaut à la terre ou rupture du conducteur neutre
- Un défaut d'un régulateur de tension d'un alternateur ou d'un régulateur en charge d'un transformateur.

Ces surtensions sont de longue durée (quelques secondes à quelques minutes) [I.2].

III.4. Surtension par Ferro-résonance

La surtension est alors le résultat d'une résonance particulière qui se produit lorsqu'un circuit comporte tout à la fois un condensateur (volontaire ou parasite) et une self avec circuit magnétique saturable (un transformateur par exemple). Cette résonance peut apparaître surtout lorsqu'une manœuvre (ouverture ou fermeture d'un circuit) est réalisée sur le réseau avec un appareil dont les pôles sont séparés ou à fonctionnement non simultané.

IV. Effet couronne et processus de la décharge couronne

IV.1. Définition de l'effet couronne

C'est un phénomène de décharge électrique partielle provoqué par l'ionisation de l'environnement entourant un conducteur. Il se produit lorsque le champ électrique dépasse une valeur critique. Ce phénomène se manifeste par l'apparition de points lumineux bleuâtres (sur certaines surfaces rugueuses en métal) ou de lignes lumineuses, ou parfois d'une longue « gaine lumineuse » qui se forme autour des conducteurs aériens transportant un courant à haute tension. (Figure I.5).



Figure I.5. Effet de couronne sur un éclateur.

IV.2. Mécanisme de la décharge couronne

Les décharges sont interprétées sur la base de deux modèles [I.4] :

- **Le premier** concerne les décharges à long rayon d'action faisant intervenir l'intervalle de décharge tout entier et notamment les effets secondaires à la cathode : *c'est la décharge de Townsend.*
- **Le deuxième** modèle mis au point pour expliquer la rapidité des phénomènes concernant les décharges à court rayon d'action, faisant intervenir la situation locale : *c'est la décharge par Streamers.*

IV.3. Avalanche électronique – streamer

IV.3.1. La décharge de Townsend

Il existe toujours dans l'air un certain nombre de paires ions positifs-électrons libres, créés par rayonnement cosmique ou par la radioactivité naturelle. Lorsque ces électrons sont soumis à un champ électrique, ils sont accélérés, et si le champ est assez intense, l'énergie qu'ils acquièrent, devient suffisante pour provoquer l'ionisation des molécules neutres qu'ils ionisent par choc. Il se crée de nouveaux électrons libres, lesquels, soumis au même champ, vont également ioniser des molécules, et ainsi de suite : *avalanche de Townsend.*

Au voisinage d'un conducteur d'une ligne électrique, les surfaces équipotentielles ont une très forte courbure. L'avalanche électronique ne peut se produire que si le champ à la surface du conducteur est atteint une valeur supérieure à 30 kV/cm. Ce champ superficiel est appelé « champ critique » [I.5].

IV.3.2. Théorie des streamers

La théorie est basée sur le concept de la croissance d'un canal ionisé mince (le streamer) entre les électrodes. Le streamer suit le traceur positivement chargé causée par l'avalanche primaire intensive. La formation d'un streamer s'explique par les phénomènes de photo-ionisation se produisant à l'intérieur des avalanches primaires [I.6]. Les électrons de grande énergie s'activant à la tête des avalanches causent l'excitation des atomes du gaz environnant en les portant à des niveaux d'énergie élevés. Ces atomes, en retrouvant leur état stationnaire, libèrent des photons. Si ces photons ont une énergie inférieure à l'énergie d'ionisation des atomes du gaz environnant, ils peuvent être absorbés par ces atomes avant d'être émis de nouveau. Si leur énergie est supérieure à l'énergie d'ionisation des atomes du gaz, de nouveaux électrons peuvent être libérés. Si les électrons ainsi produits sont situés au voisinage de l'avalanche primaire, ils vont créer de nouvelles avalanches dites secondaires [I.7].

Dans le cas du streamer positif, l'avalanche primaire initiée par un électron germe amène la présence d'une charge d'espace positive près de la cathode et une injection d'électrons devant l'électrode positive (figure I.6) [I.8]-[I.9].

Dans le cas du streamer négatif, les ions positifs créés par les avalanches secondaires viennent extraire des électrons de la cathode qui neutralisent les ions positifs et donnent au streamer un excédent de charges négatives. À la différence du streamer positif où les avalanches se développent vers la tête du streamer, les avalanches secondaires dans le streamer négatif se propagent vers l'anode, dans le sens où l'effet de la charge d'espace décroît rapidement (Figure 1.6).

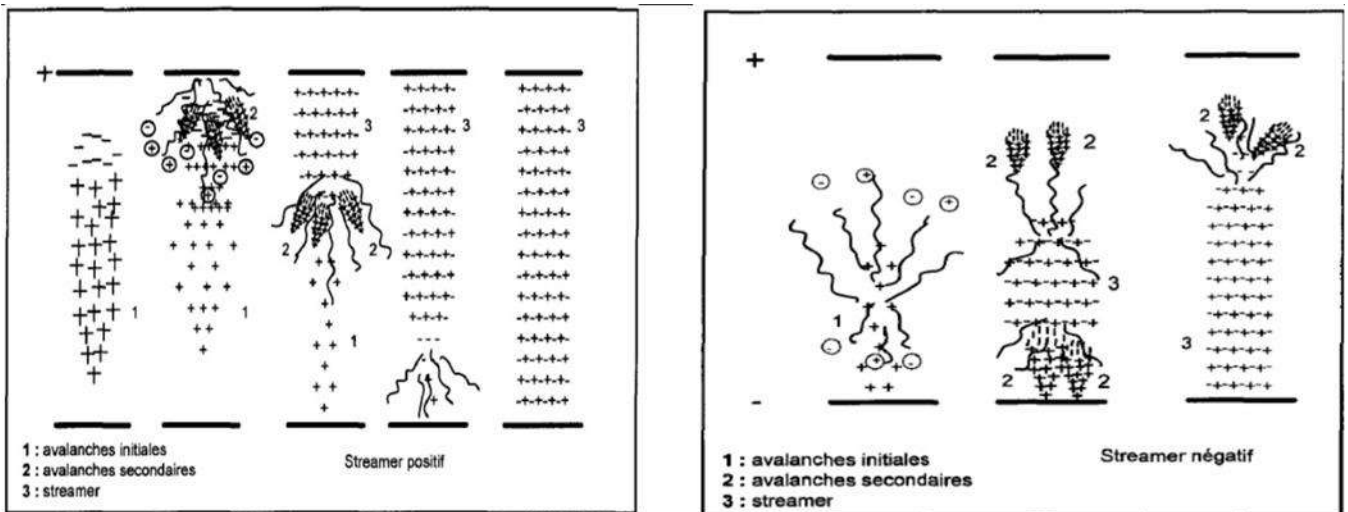


Figure I.6. Représentation du processus de développement d'un streamer positif et négatif.

IV.4. Modes d'émission des charges

Les premières expériences sur l'effet couronne, qui datent du début du siècle, étaient faites à l'aide de fil mince, de quelques millimètres de diamètre. Portés à une tension suffisante, il se forme autour d'eux une gaine lumineuse.

Lorsque le diamètre du fil croît, pour atteindre les dimensions des câbles utilisés sur les lignes de transport d'énergie, l'effet couronne perd cet aspect de gaine lumineuse uniforme ; il se discrétise en éclat localisée désignées sous le nom général d'aigrettes.

La présence de certaines aspérités sur les conducteurs HT qui provoquent des irrégularités de surface telles que les dépôts de poussières végétale, de pollution industrielle et même de petits insectes où il existe un renforcement local du champ. Il se forme donc un système dissymétrique des électrodes pouvant être assimilés à un système pointe plan, et ont pour conséquence une réduction du niveau de la tension d'apparition des aigrettes [I.10].

IV.4.1 Aigrettes négatives (impulsion de TRICHEL)

Lorsque le champ critique négatif est atteint au sommet de la pointe ou de l'aspérité, il apparaît un courant impulsionnel avec une fréquence de relaxation qui peut aller de 1kHz à 100kHz.

En général, les impulsions sont d'autant plus petites et plus serrées que la pointe est fine, leur largeur est de l'ordre de la microseconde, leur amplitude est relativement faible (de l'ordre de milliampère) mais elles sont caractérisées par des fronts raides.

A ces impulsions dites impulsions de TRICHEL, correspond visuellement un cône lumineux dont le sommet plus brillant est posé sur la pointe. Le mécanisme de ces impulsions est de type avalanche négative [I.10].

IV.4.2. Zone de conductivité d'HEMERSTEIN

C'est un mode d'émission en polarité positive qui a la propriété d'être continu. Il a lieu généralement, en tension alternative, immédiatement au-dessus du seuil positif. Sa participation est importante dans la formation des pertes couronne mais négligeable dans la formation des perturbations radioélectriques [I.10].

IV.4.3. Aigrettes positives

Le mode d'émission impulsionnel apparaît au-delà de la zone continue d'HEMERSTEIN pour des champs positifs un peu supérieurs.

Le courant d'émission prend la forme d'une série irrégulière d'impulsion de grande amplitude ($\geq 100\text{mA}$). Visuellement, elles se présentent comme des aigrettes très lumineuses, dont la base est attachée à une aspérité de câble, et qui se propage d'une façon arborescente à des distances de plusieurs centimètres. Leur mécanisme de formation est de type Streamer. Ces aigrettes sont responsables du bruit radioélectrique des lignes à hautes tension [I.10].

V. Différents régimes de la décharge (caractéristique courant-tension)

L'analyse de la figure I.7 décrit le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée. Et permet de distinguer quatre régimes régissant la décharge couronne [I.11].

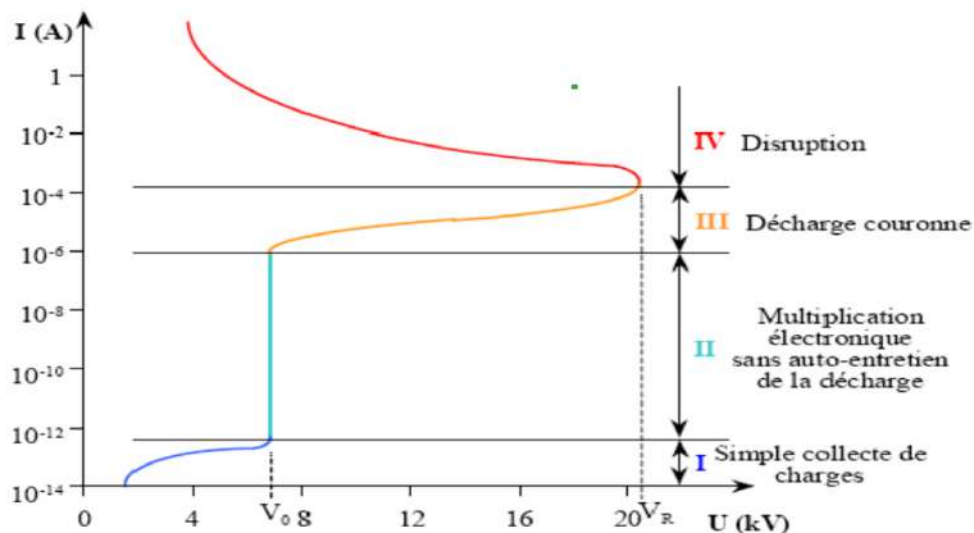


Figure I.7. Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan)

- **le premier régime :** consiste en la collecte des espèces chargées présentes naturellement dans le milieu. Ces espèces sont produites par l'impact de rayons cosmiques ou de particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) sur le gaz présent dans l'espace inter électrodes.
- **Le second régime :** qui se produit à partir d'une tension seuil « V_0 », traduit-le déclenchement de l'*avalanche électronique de Townsend* mais ne répond pas encore au

critère d'auto entretien de la décharge, la décharge est qualifiée de non autonome car elle dépend de processus d'ionisation externes pour donner naissance aux électrons germes. Le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée.

- **Le troisième régime** : l'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessiter de phénomènes d'ionisation extérieurs. La décharge est autoentretenu. C'est le régime de la *décharge couronne*, où apparaissent les dards, appelés aussi streamers, qui sont responsable de la composante impulsionnelle du courant.
- **Le quatrième régime** : au-delà d'une tension appliquée « V_R », la température du canal augmente fortement, ce qui provoque *la dilatation brutale du gaz*. Le champ électrique E est alors suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisation deviennent majoritaires par rapport à l'attachement électronique. Le régime d'arc est atteint, le milieu passe à l'état de plasma thermique.

VI. Modes de décharge par effet couronne

Selon la polarité et l'intensité du champ électrique, on distingue plusieurs modes de décharges couronne :

VI.1.Effet couronne en tension continue positive

En tension positive, les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques se déplacent vers l'anode dans la zone où le champ électrique est le plus intense tel qu'illustré à la (figure 1.8.a). Ils sont rapidement captés par l'anode, ce qui a pour effet de laisser dans l'espace entre les électrodes les ions positifs, autre produit des avalanches électroniques (Figure I.8.b). Les ions positifs sont plus lourds et plus lents que les électrons. Ces ions positifs forment la charge d'espace positive qui se déplace vers la cathode, où le champ électrique est moins intense (Figure I.8.c) [I.9], [I.12].

Dès que la tension appliquée dépasse la valeur critique de l'effet couronne, les effluves ou les streamers se forment avec un canal radial fortement ionisé et avec de multiples dérives de moindres intensités. Ces dernières se situent dans une zone où le champ électrique est relativement modéré [I.13].

VI.2. Effet couronne en tension continue négative

Les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques sont repoussés par la cathode vers la zone de champ électrique plus faible tel qu'illustré à la (Figure I.8.d). Ceux-ci se recombinent rapidement avec les molécules neutres et forment des ions négatifs (Figure I.8.e). Pendant ce temps, les ions positifs créés lors des avalanches électroniques s'approchent de la cathode dans la zone de champ intense (figure I.8.f). Ils sont captés avant que les ions négatifs ne s'éloignent suffisamment de la cathode pour ne plus modifier le champ électrique dans la zone active. Les ions négatifs forment alors la charge d'espace négative (Figure I.8.g).

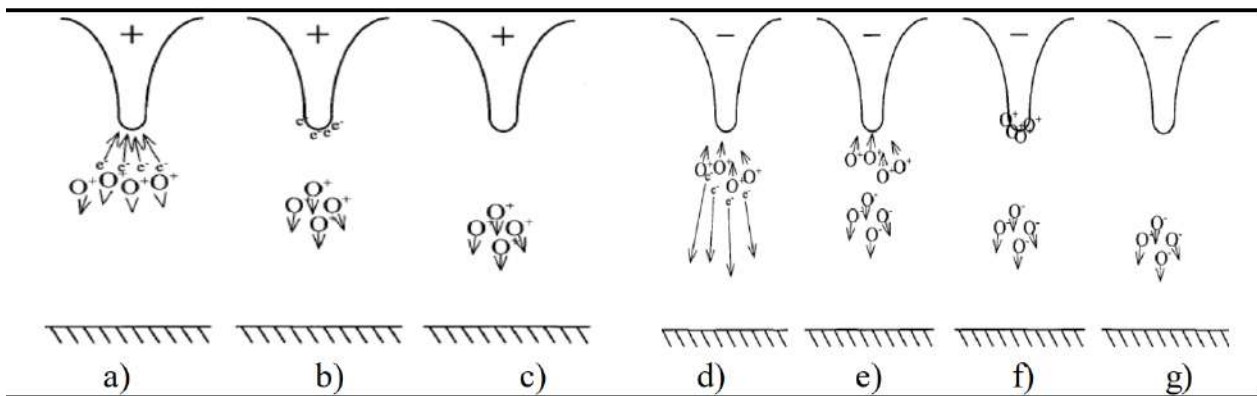


Figure I.8. Effet de couronne en tension positive et négative.

VI.3. Effet couronne en tension alternative

Il est physiquement possible de voir apparaître, en tension alternative, tous les modes de décharges couronne en tension continue. Les alternances positives et négatives peuvent donner lieu à leurs modes de décharge respectifs. Cependant, il faut considérer le temps d'évacuation des charges d'espace formées pendant une alternance pour prévoir les modes qui seront possibles pendant l'alternance suivante. La distance entre les électrodes ainsi que le gradient de tension déterminent le temps de migration des ions et, par le fait même, leur effet sur les décharges. Si les ions n'ont pas le temps d'être évacués avant le changement de polarité de la tension appliquée, ceux-ci réduiront le champ électrique et l'intensité des décharges pendant l'alternance suivante. Donc, pour une même tension, les décharges sont moins intenses en tension alternative qu'en tension continue [I.14].

VII. Champ et tension électrique d'apparition de l'effet couronne

VII.1. Loi de Peek -seuil critique de l'effet couronne

Lorsqu'un conducteur est soumis à une tension croissante, le *champ critique de l'effet couronne* E_c est défini par l'apparition brusque d'une importante conductivité de l'air dans son voisinage immédiat.

Pour évaluer le seuil de l'effet couronne à la surface de l'anode, Peek, en s'inspirant de la théorie de Townsend proposée en 1920, a suggéré pour la première fois une loi empirique établie en géométrie cylindrique dans l'air ambiant, et en tension alternative. Cette équation (I.1) est appelée depuis la loi de Peek [I.15].

$$E_c = E_0 \delta m \left(1 + \frac{k}{\sqrt{\delta r_0}}\right) \quad (\text{I.1})$$

Où: E_c est le champ critique, en [kV/cm].

E_0 : La valeur crête du champ électrique aux conditions normales, $E_0 = 31$ kV/cm.

k : Le coefficient, $k = 0,308$.

r_0 : Le rayon du conducteur, en [cm].

δ : La densité relative de l'air.

m : Coefficient d'état de surface, $m \leq 1$.

Avec :

$$\delta = \frac{P}{P_0} \frac{273+t_0}{273+t} \quad (\text{I.2})$$

$P_0 = 76$ cmHg, $t_0 = 25^\circ\text{C}$

Le terme $\left(1 + \frac{k}{\sqrt{\delta r_0}}\right)$ est appelé correction de Peek, il tient compte du fait que plus le rayon du conducteur est petit plus il est difficile d'ioniser loin de ce conducteur. Cette difficulté d'ioniser est due au fait que le champ électrique décroît très rapidement en s'éloignant du conducteur [I.16].

Il est plus intéressant de connaître U_c (tension d'apparition de l'effet couronne) que E_c (champ critique d'apparition de l'effet couronne):

$$U_c = E_0 \delta m \left(1 + \frac{k}{\sqrt{\delta r_0}}\right) r_0 \text{Ln} \frac{2h}{r_0} \quad (\text{I.3})$$

VIII. Utilisation et conséquences de l'effet couronne

L'effet couronne peut être utilisé à des fins industrielles intéressantes. Il se manifeste de façon positive par l'atténuation de la propagation des surtensions atmosphériques. Par contre, il peut apparaître de façon indésirable sur les composantes des lignes à haute tension.

VIII.1. Utilisation de l'effet couronne

La génération de charges électriques dans le phénomène d'effet de couronne est utilisée dans plusieurs procédés industriels tels que la précipitation et la vaporisation électrostatique. En chargeant des particules ciblées à l'aide des charges électriques générées par l'effet de couronne, on peut recueillir des poussières nuisibles avant leur évacuation dans l'air (précipitateurs) ou encore expulser de fines particules (ex: peinture) à un débit très précis et régulier (vaporisateurs). Au niveau des lignes électriques, l'effet couronne autour des conducteurs a pour effet de réduire l'amplitude et de ralentir la propagation des surtensions (ex: manœuvre, foudre...) [I.17].

Les décharges couronne ont de nombreuses autres applications commerciales et industrielles tel que :

- Production d'ozone.
- Traitement de surface de certains polymères.
- Photocopieur.
- Laser à azote.
- Refroidissement de composants électroniques (la migration des particules ionisées génère un flux qui expulse l'air chaud).
- Coloration des véhicules.

VIII.2. Conséquences positives de l'effet couronne

Les surtensions atmosphériques qui se propagent le long des conducteurs sont déformées à cause de l'effet couronne (perte par ionisation de l'air entourant le conducteur, importante pour $U > 1 \text{ MV}$).

VIII.3. Conséquences négatives de l'effet couronne

Au niveau du transport de l'énergie électrique, l'effet couronne est la source de pertes électriques, d'interférences radiophoniques et télévisuelles, de bruits audibles, de la détérioration

de l'état de surface des composantes et de vibrations mécaniques. De plus, les sous-produits de l'effet couronne dans les milieux isolants de certains disjoncteurs (SF6) et transformateurs (huile), diminuent leur pureté et leurs propriétés isolantes. Les décharges électriques dans l'air génèrent aussi de l'ozone, qui est un gaz irritant [I.17].

VIII.3.1. Pertes d'énergie

Les pertes d'énergie annuelles causées par l'effet couronne sont relativement faibles. C'est surtout lors de mauvais temps que ces pertes deviennent temporairement importantes.

Les pertes maximales pendant des courtes périodes perturbées, par exemple sous la pluie ou la neige, peuvent même atteindre des centaines de kW/km. Cette augmentation des pertes a une influence négative sur la livraison d'énergie. Les pertes entraînées par effet couronne augmentent avec le niveau de tension. En vue de réduire les pertes d'énergie très élevées, les concepteurs des lignes de transport déterminent les diamètres des conducteurs en fonction du champ critique E_c .

VIII.3.2. Interférences radio - télévision

Lors des décharges par effet couronne, les charges électriques (électrons, ions positifs, ions négatifs, photons) se déplacent au voisinage des conducteurs. Ce déplacement des charges est à l'origine des inductions électromagnétiques.

Les courants induits peuvent être transmis par les transformateurs ou conduits par le conducteur neutre pour atteindre les récepteurs (radio et TV) et créer des perturbations appelées interférences radio - télévision [I.18].

VIII.3.3. Bruit audible

Il est connu depuis longtemps que l'effet couronne pendant la pluie donne des impressions acoustiques de crépitement et de sifflements. Cependant, les responsables des lignes de transport d'énergie n'ont reçu des plaintes, relatives aux gênes acoustiques, que depuis la mise en service des lignes dont la tension dépasse 500 kV. En-deçà de cette tension, les interférences radiophoniques sont plus importantes, de sorte que si les conducteurs sont choisis pour assurer un niveau acceptable d'interférence radiophonique, les bruits audibles ne devraient pas être un problème [I.19].

VIII.3.4. Vent ionique

Une des conséquences des décharges couronne est la création du vent ionique. Les ions créés par ces décharges sont accélérés par le champ électrique. La vitesse est transférée aux molécules du gaz ambiant par la collision, lui donnant un mouvement de la pointe de l'aspérité vers le milieu du gaz [I.17], [I.20].

VIII.3.5. Vibrations mécaniques des conducteurs

En temps pluvieux et en présence d'un champ électrique élevé, les conducteurs des lignes de transport d'énergie électrique se mettent à vibrer à la fréquence naturelle de la portée. Ce type vibration est associé à la décharge par effet couronne des gouttes d'eau suspendues en dessous des conducteurs. Il est aussi observé en présence de brouillard ou de neige mouillée [I.13], [I.17].

VIII.3.6. Production d'ozone et des oxydants

La décharge couronne est aussi accompagnée d'un dégagement d'odeur due à la formation de l'ozone. Par ailleurs, en présence de l'humidité, de l'acide nitrique est produit qui cause la corrosion du conducteur [I.21].

IX. Applications utilisant la décharge couronne

IX.1. Paratonnerre

L'effet couronne augmente la conductivité de l'air autour de la pointe ; le canal de la foudre qui opte pour le chemin le moins résistant est capté par le paratonnerre [I.22].

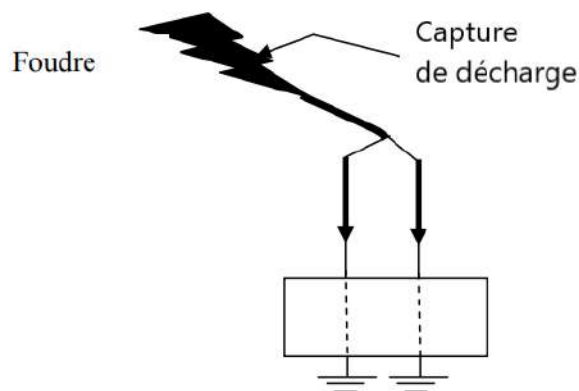


Figure I.9. Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre.

IX.2. Neutralisation

La surface de l'avion se charge par frottement avec l'air. Les charges créées par effet couronne produites par des flèches disposées sur les ailes de l'avion éliminent par neutralisation les charges surfaciques [I.22].

IX.3. Filtre électrostatique

Le fil central produit par effet couronne des charges électriques négatives. Les grains de poussière qui se chargent négativement sont attirés et captés par le cylindre qui les empêche de ressortir. Le cylindre joue le rôle d'un filtre de poussières, lequel une fois saturé sera remplacé par un nouveau filtre [I.22].

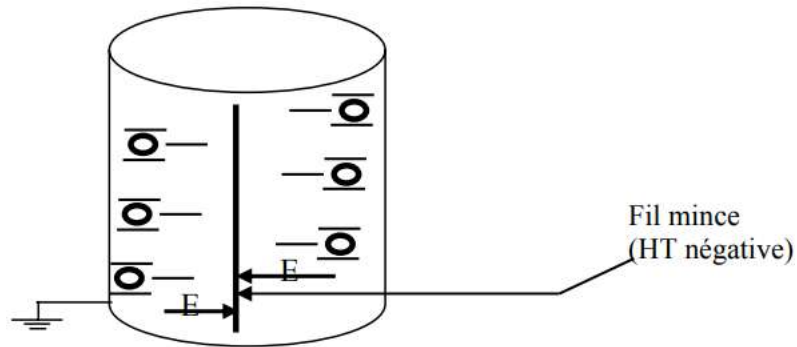


Figure I.10. Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique.

IX.4. Séparateur électrostatique

Un mélange de particules granuleuses acquiert des charges électriques créées par effet couronne grâce à une électrode à pointes reliée à une source de haute tension négative.

Ces particules se comportent différemment selon qu'elles sont isolantes ou métalliques et tombent dans des endroits différents [I.22].

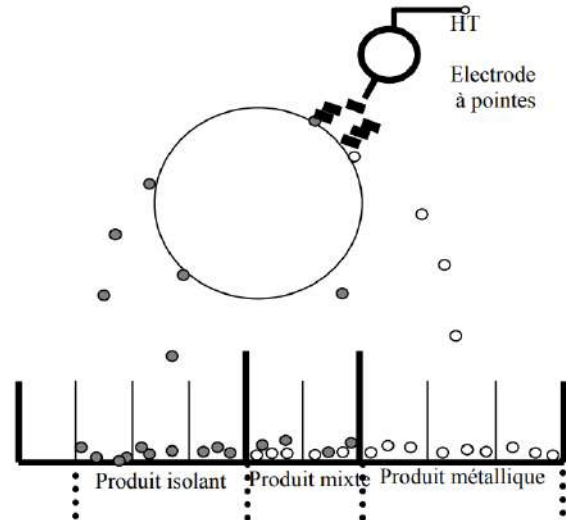


Figure I.11. Utilisation de la décharge couronne dans la séparation électrostatique.

X. Avantage de la décharge couronne dans le réseau

Lorsque le champ électrique à la surface du conducteur dépasse le seuil critique, les charges générées par l'effet couronne neutralisent partiellement les charges du conducteur. Cela entraîne une diminution du champ électrique à la surface et du potentiel de conducteur. On considère que l'effet couronne agit comme un régulateur de tension.

Ainsi, la décharge couronne atténue les surtensions sur les lignes électriques, en particulier celles causées par la foudre. Lorsque l'effet couronne se produit autour du conducteur dans l'air environnant, cela augmente la conductivité et le diamètre du conducteur, ce qui paradoxalement réduit le champ électrique.

XI. Réduction de l'effet couronne sur les lignes électriques

Il est essentiel d'éviter les décharges de couronne sur les lignes électriques, car elles entraînent divers problèmes :

- Dans les installations de transmission électrique, elles entraînent des pertes d'énergie, du bruit et une distorsion des tensions et des courants.
- Dans la plupart des équipements électriques tels que les transformateurs et les machines électriques (générateurs et moteurs), elles endommagent progressivement les isolants, ce qui conduit à une détérioration prématurée des équipements.
- Dans toutes les situations nécessitant une tension élevée, mais où la production d'ozone

doit être minimisée.

La réduction de l'effet couronne sur les lignes à haute tension nécessite généralement des mesures spécifiques uniquement lorsque le niveau de tension de la ligne dépasse 245 kV. Outre la réduction des nuisances pour les populations, le coût économique des pertes en ligne causées par l'effet couronne peut justifier à lui seul la mise en place de mesures correctives. Ces mesures comprennent 2 types :

XI.1. Utilisation de conducteurs de gros diamètre

La limitation du champ électrique à la surface à l'aide de cette mesure est souvent inefficace et rarement justifiée sur le plan économique, car l'effet de peau rend souvent inefficace l'utilisation de conducteurs de grande section.

XI.2. Utilisation de faisceau de conducteurs

Une technique permettant de limiter l'effet couronne, consiste à remplacer un conducteur par plusieurs conducteurs maintenus à une distance fixe (par des entretoises), dont la section totale est égale à celle du conducteur unique. Deux (02) conducteurs sont utilisés pour une tension de 400 kV, trois (03) conducteurs pour 500 kV. Cette technique trouve son application dans les lignes à très haute tension (supérieures à 300 kV). Par conséquent cet arrangement permet aussi de maintenir les champs superficiels des conducteurs à des valeurs admissibles (une valeur de l'ordre de 17 kV/cm).

Le choix du nombre de conducteurs d'une ligne électrique se fait donc en fonction du courant à transiter, des conditions climatiques, des effets de peau et l'effet couronne, et bien-sûr des aspects économiques [I.10]-[I.11].

Un faisceau de conducteur est caractérisé par les grandeurs suivantes :

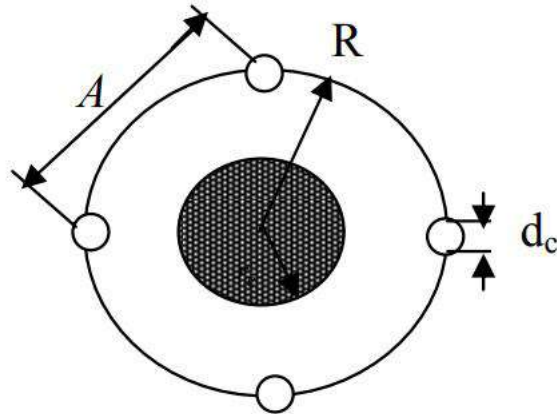


Figure I.12. Grandeurs caractéristiques d'un faisceau de conducteur.

$$A = 2R \sin \frac{\pi}{n} \quad (\text{I.4})$$

$$r_{ec} = R^n \sqrt{\frac{nr}{R}} \quad (\text{I.5})$$

Avec:

r : Rayon des conducteurs élémentaires [cm].

n : Nombre de conducteurs élémentaires.

R : Rayon géométrique (rayon du cercle passant par les centres de tous les conducteurs) [cm].

A : Distance entre deux conducteurs consécutifs [cm].

r_{ec} : Rayon équivalent. C'est le rayon d'un conducteur cylindrique unique, fictif, qui aurait les mêmes capacités que le faisceau réel par rapport à tous les autres conducteurs avoisinant [cm].

Références bibliographiques

- [I.1] Michel Bougue, INEO, Lignes électriques aériennes à très haute tension, Tome 3 : Etudes techniques, 2006.
- [I.2] D. Fulchiron, " Surtensions et Coordination de l'isolement ", Cahier Technique Merlin Gerin n° 151, édition 1992.
- [I.3] B.DE METZ-NOBLAT « La foudre et les installations électrique HT ». Cahier de charge n°168, Edition 1993.
- [I.4] L. Zibin. «Etude des mécanismes de dégradation de polymères par décharges électriques de type filamentaire». Thèse de doctorat de l'université PARIS VI, 1991.
- [I.5] C. GARY « Effet couronne sur les réseaux électriques aériens ». Technique d'ingénieur, traité génie électrique, D4440, 2003.
- [I.6] H. Pang, ' dépoûssiérage électrostatique pour les particules submicroniques en atmosphère usuelle (terre) et raréfiée (planète mars)', Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble, 2006.
- [I.7] I. Fofana, 'Modélisation de la décharge positive dans les grands intervalles d'air', Thèse. Doctorat, Université.de Lyon, 1996.
- [I.8] J. H. Rakotonandrasana, 'Modélisation de la décharge négative dans les grands intervalles d'air - Application à la foudre', Thèse. Doctorat, l'école doctorale. Lyon, 2008.
- [I.9] T. G. Olivera, 'Etude expérimentale du contournement des isolateurs recouverts de glace sous tensions de foudre et de manœuvre', Thèse. Ingénieur, Université. Québec, 2004.
- [I.10] C. GARY ; « Effet couronne en tension alternative » : Techniques de l'ingénieur, Tome 1 D640, 1974.
- [I.11] M. Aguet et M. Lanoz «Traité d'électricité : Haute Tension», vol XXII 2ème édition 2004.
- [I.12] I. Ndiaye, 'Initiation et développement des décharges couronnes sur une surface de glace', Thèse Ingénieur, Université. Québec, 2003.
- [I.13] M. Hamel, 'influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne', Thèse. Magistère, université du Québec, 1991.
- [I.14] V. J. Levitov, « Couronne du courant alternatif », Energya, Moscou, 1975.
- [I.15] D.V. Razevig, « Technique de haute tension », Energya, Moscou, 1976.
- [I.16] K. Hamouimeche. «Étude de l'interaction entre une barrière de papier et une décharge couronne en géométrie pointe-plan». Mémoire de magister, UMMTO, 2009.

- [I.17] C. Potvin, 'Comportement et effet de la charge d'espace sur le mécanisme des vibrations induites par effet de couronne', Thèse. Ingénieure, Université. Québec, 2000.
- [I.18] C. S. Indulkar, 'Sensitivity Analysis of Corona and Radio Noise in EHV Transmission Lines', IE (I) Journal, Vol. 84, pp. 197-200, 2004.
- [I.19] E. R. Taylor, V. L. Chartier, D. N. Rice, 'Audible Noise and Visual Corona from HV and EHV Transmission Lines and Substation Conductors Laboratory Tests', IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems, Vol. PAS-88, No. 5, pp. 666-679, 1969.
- [I.20] J. C. Matéo-Vélez, F. Thivet, P. Degond, « Modélisation élémentaire du vent ionique dans une décharge Couronne », 4^{ème} Conférence de la Société Française d'Electrostatique Poitiers (France), 2004.
- [I.21] B. Yacine, 'Détermination des conditions d'ionisation caractérisant le seuil de claquage de l'air par la logique floue', Thèse de Magister, Université de Batna, 2005.
- [I.22] K. Hocine, « Influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.

Chapitre II

Modélisation de la décharge couronne dans le réseau électrique

I. Introduction

Le réseau électrique par son étendu le siège de plusieurs interférence électromagnétique d'origines artificielles et naturelles, l'un de ses phénomènes courants est l'effet couronne qui apparait quand la tension sur le conducteur de la ligne dépasse un certain seuil appelé tension d'apparition couronne ou quand la valeur du champ électrique autour du conducteur est supérieur à la valeur du champ critique, donc il y'a une augmentation dans la capacité du conducteur, qui est le concept de base, adopté généralement dans la modélisation de l'effet couronne.

Dans ce chapitre consacré aux concepts théorique que nous avons utilisé durant notre travail, nous exposons en première partie la modélisation du support de propagation où nous avons adopté un concept basé sur la théorie des lignes de transmission, nous avons opéré par résolution des équations des lignes directement en temporel par FDTD.

En seconde partie de ce chapitre nous allons rappeler les différents modèles existant dans la littérature ainsi que leur implémentation dans un code de calcul. Notre étude sera couronnée par une validation par comparaison de nos résultats de calculs avec ceux publiés.

II. Modélisation des lignes électriques

II.1. Paramètres linéiques d'une ligne aérienne dont le retour s'effectue par le sol

La modélisation du support de propagation par schémas équivalents est tributaire de la nature du signal qui y circule (spectre fréquentiel). La connaissance des caractéristiques linéiques de la ligne est alors indispensable pour la caractérisation de la propagation des signaux dans le réseau électrique.

II.1.1. Paramètres linéiques longitudinaux

La difficulté d'introduire dans les calculs le conducteur de terre provient du fait que les dimensions de la couche de terre par où passe le courant sont mal définies, que la répartition du courant dans cette couche n'est pas uniforme et que la résistivité du sol est irrégulière dans l'espace et variable au cours du temps. Cependant en tenant compte des deux hypothèses fondamentales (homogénéité et conservation du courant) et en prenant en compte la résistivité finie du plan de masse ou non, les paramètres linéiques longitudinaux de la ligne de transport d'énergie peuvent être déterminés de plusieurs manières :

- Méthode des images [II.1].
- Méthode du plan fictif complexe [II.1].
- Méthode de Carson [II.2].
- Méthode de Sunde [II.2].

La différence principale entre ces différentes méthodes réside dans la façon de prendre en compte l'existence du sol en tant que demi-milieu dissipatif et conducteur.

Dans notre travail, nous avons constaté que la fréquence maximale n'excède pas les quelques Méga-Hertz ce qui nous a permis d'opter pour la méthode du plan fictif complexe.

II.1.1.1. Théorie du plan complexe fictif (Gary)

Cette méthode consiste à introduire la profondeur de pénétration fictive « p » dans le sol, telle que l'image de chaque phase dans le sol soit située à une profondeur égale à la somme de la hauteur de la phase en question et deux fois l'épaisseur de peau dans le sol (figure II.1).

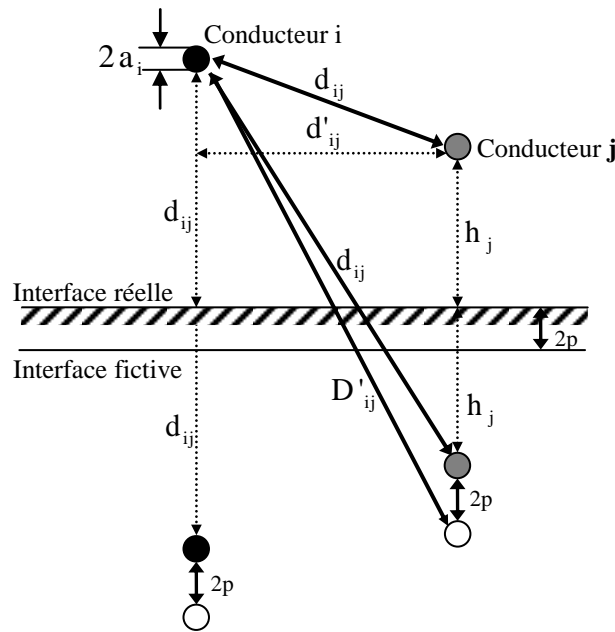


Figure II.1. Configuration géométrique pour la méthode du plan complexe fictif.

Les expressions (II.1) et (II.2) expriment les impédances linéiques propres et mutuelles [II.1]:

$$Z_{ii} = R_{ii} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2 \cdot (h_i + p)}{a_i} \right) \quad (\text{II.1})$$

$$Z_{ij} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D'_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma_s}} \quad : \text{Épaisseur de peau complexe.}$$

II.1.2. Paramètres linéiques transversaux

Les caractéristiques transversales rendent compte des effets des charges superficielles des conducteurs de phase et du sol, ces charges superficielles provoquent un champ électrique perpendiculaire à la surface des conducteurs qui engendre des courants capacitifs lorsqu'il varie et éventuellement des courants de conduction si la matière isolante entre conducteurs n'est pas parfaite. Généralement la conductance d'une ligne aérienne est négligée. Dans le paragraphe suivant nous donnons un bref aperçu sur le calcul de la matrice capacité nodale [II.1].

II.1.2.1. Calcul des capacités linéiques

Le calcul des capacités linéiques propres et mutuelles passe par le calcul de la matrice des coefficients de potentiel ; Les expressions (II.3) et (II.4) donnent les coefficients de potentiel propres et mutuels pour une ligne située à une hauteur h du sol [II.1]:

$$p_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(2 \frac{h_i}{a_i} \right) \quad (\text{II.3})$$

$$p_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad (\text{II.4})$$

L'inversion de cette dernière nous permet d'obtenir la matrice nodale des capacités linéiques $[C]$.

II.2. Modélisation de la réponse temporelle d'un réseau électrique par FDTD

Notre objectif est le calcul de la répartition des courants et des tensions directement en temporel par résolution d'un système d'équations $[A].[X]=[B]$ en se basant sur la discrétisation des équations des lignes par FDTD que nous détaillons sur la figure II.2 [II.2]:

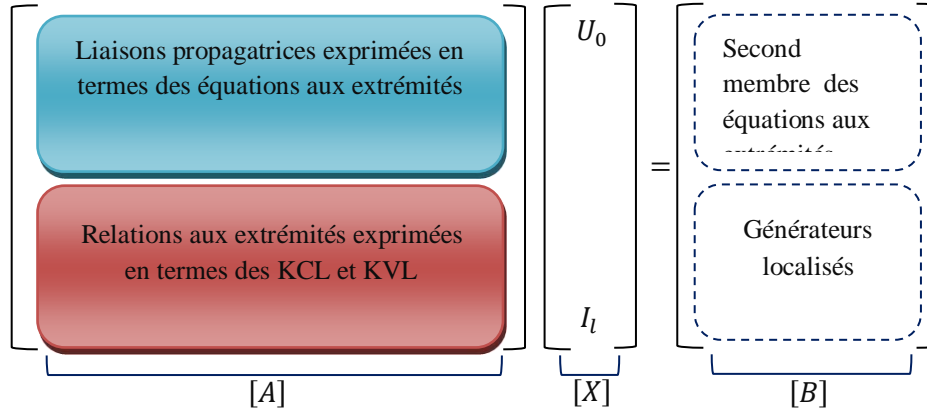


Figure II.2. Forme générale du système matriciel.

Cette représentation met en évidence une matrice topologique $[A]$ composée de deux sous matrices (II.5) :

$$[A] = \begin{bmatrix} [A_1] \\ [A_2] \end{bmatrix} \quad [B] = \begin{bmatrix} [B_1] \\ [B_2] \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$[A_1]$: Sous matrice déduite de la représentation des équations aux extrémités.

$[A_2]$: Sous matrice déduite des lois de Kirchhoff (*KCL* et *KVL*) aux extrémités de la ligne.

$[X]$: Vecteur inconnu, contient les courants et les tensions aux nœuds d'extrémités.

$[B_1]$: Sous vecteur déduit de second membre des équations aux extrémités.

$[B_2]$: Sous vecteur déduit qui contient les sources d'excitation.

II.2.1. Equations des lignes en temporel

Dans le cas d'une analyse sans prise en compte de la variation des paramètres linéiques avec la fréquence les équations des lignes s'expriment par (II.6) et (II.7) :

$$\frac{\partial[v(x, t)]}{\partial x} + [R][i(x, t)] + [L] \frac{\partial[i(x, t)]}{\partial t} = [0] \quad (\text{II.6})$$

$$\frac{\partial[i(x, t)]}{\partial x} + [G][v(x, t)] + [C] \frac{\partial[v(x, t)]}{\partial t} = [0] \quad (\text{II.7})$$

Où: $[v(x, t)]$ et $[i(x, t)]$ sont respectivement la tension et le courant distribués et inconnus le long de la ligne.

La matrice résistance linéique [R], matrice conductance linéique [G], matrice inductance linéique [L] et la matrice capacité linéique [C] peuvent être définies par le concept déjà détaillé en haut.

II.2.2. Discrétisation par FDTD des équations des lignes à constantes réparties

II.2.2.1. Echantillonnage spatial

Le schéma en figure II.3 illustre l'application de la méthode des différences finies à points centrés (FDTD) ; chaque conducteur est subdivisé alternativement en des nœuds de courant et de tension [II.3].

- Deux nœuds consécutifs d'un même type sont séparés par un intervalle Δx ,
- Les deux extrémités de conducteur sont définies comme des nœuds de tension.

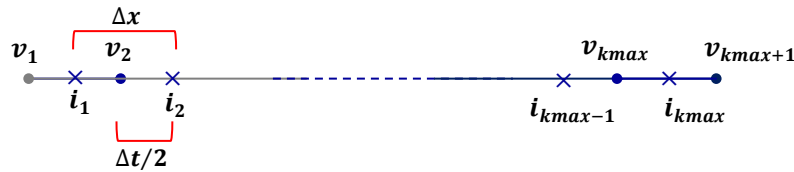


Figure II.3. Découpage de la branche.

Pour une écriture discrète des équations des lignes, il est nécessaire de définir un pas temporel Δt et un pas spatial Δx .

Le choix du pas de discrétisation spatiale ainsi que le pas temporel est géré par la condition de stabilité (II.8) :

$$v_p \leq \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (\text{II.8})$$

Où: v_p : vitesse de propagation de l'onde dans le milieu.

Une démonstration présentée dans [II.3] prouve que si l'on a $v_p = \Delta x / \Delta t$, la méthode des différences finies à points centrés donne la solution avec le minimum d'erreur.

II.2.2.2. Echantillonnage spatio-temporel

Comme dans l'espace, le courant et la tension sont décalés d'un demi-pas temporel. Plus précisément, les échantillons de courant sont en retard de $\Delta t/2$ sur la tension. La figure II.4 illustre l'entrelacement des tensions et des courants dans l'espace et dans le temps.

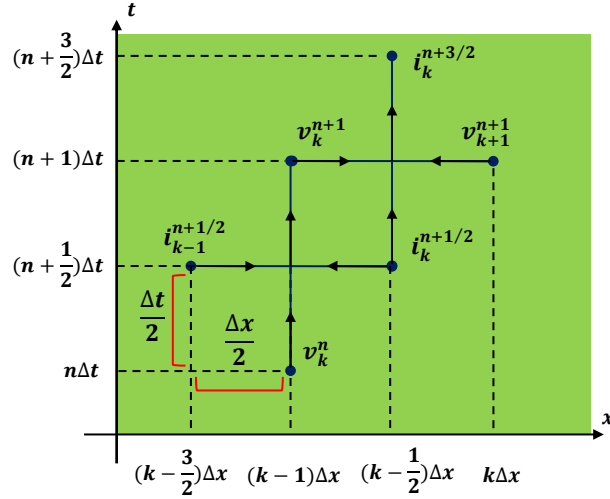


Figure II.4. Entrelacement spatial et temporel [II.3].

II.2.2.3. Discrétisation des équations des lignes par FDTD

▪ Mise en équations

Les échantillonnages spatial et temporel définis plus haut conduisent à considérer les grandeurs suivantes :

- La tension sous forme discrète aux nœuds de tension et aux instants $n\Delta t$:

$$[v_k^n] \equiv [v[(k-1)\Delta x, n\Delta t]] \quad (\text{II.9})$$

- Le courant, sous forme discrète aux nœuds de courant et aux instants $n\Delta t$:

$$[i_k^n] \equiv [i[(k-1/2)\Delta x, (n+1/2)\Delta t]] \quad (\text{II.10})$$

Avec:

$$l \equiv k_{max}\Delta x \quad (\text{II.11})$$

$$t_{max} \equiv n_{max}\Delta t \quad (\text{II.12})$$

En exprimant par FDTD les dérivées spatiales et temporelles, les systèmes d'équations (II.6) et (II.7) deviennent :

$$\frac{[v_{k+1}^n] - [v_k^n]}{\Delta x} + [L] \frac{[i_k^{n+1/2}] - [i_k^{n-1/2}]}{\Delta t} + [R] \frac{[i_k^{n+1/2}] + [i_k^{n-1/2}]}{2} = [0] \quad (\text{II.13})$$

$$\frac{[i_k^{n-1/2}] - [i_{k-1}^{n-1/2}]}{\Delta x} + [C] \frac{[v_k^n] - [v_k^{n-1}]}{\Delta t} + [G] \frac{[v_k^n] + [v_k^{n-1}]}{2} = [0] \quad (\text{II.14})$$

Nous pouvons alors déduire les équations de récurrences suivantes pour une branche:

- $k = 1, \dots, k_{max}$

$$[i_k^{n+1/2}] = \left([L] \frac{\Delta x}{\Delta t} + [R] \frac{\Delta x}{2} \right)^{-1} \left[\left([L] \frac{\Delta x}{\Delta t} - [R] \frac{\Delta x}{2} \right) ([i_k^{n-1/2}]) - ([v_{k+1}^n] - [v_k^n]) \right] \quad (\text{II.15})$$

- $k = 2, \dots, k_{max}$

$$[v_k^n] = \left([C] \frac{\Delta x}{\Delta t} + [G] \frac{\Delta x}{2} \right)^{-1} \left[\left([C] \frac{\Delta x}{\Delta t} - [G] \frac{\Delta x}{2} \right) [v_k^{n-1}] - ([i_k^{n-1/2}] - [i_{k-1}^{n-1/2}]) \right] \quad (\text{II.16})$$

En imposant les conditions aux extrémités, les équations de récurrences (II.15) et (II.16) nous permettent de calculer la distribution des courants et des tensions le long de la ligne de transmission.

II.2.3. Représentation quadripolaire d'une ligne dans le domaine temporel

Comme nous l'avons vu sur la figure II.3, lors de la discrétisation des équations des lignes par FDTD, les nœuds courants et tensions ne coexistent ni dans le temps ni dans l'espace. Afin de déduire les équations nodales en courant ($[i_0^{n+1}]$, $[i_{k_{max}+1}^{n+1}]$) et en tension ($[v_0^{n+1}]$, $[v_{k_{max}+1}^{n+1}]$) au même instant, deux nœuds fictifs sont générés ; ces nœuds fictifs sont obtenus en remplaçant Δx par $\Delta x/2$ à l'instant $t = n\Delta t$ respectivement pour $k = 1$ et $k = k_{max}+1$ dans (II.16) et notant :

$$[v_1^n] = [v(0)]^n \text{ et } [i_0^{n-1/2}] = [i(0)]^{n-1/2}, \text{ pour } x = 0$$

$$[v_{k_{max}+1}^n] = [v(l)]^n \text{ et } [i_{k_{max}+1}^{n-1/2}] = [i(l)]^{n-1/2}, \text{ pour } x = l$$

En considérant la moyenne temporelle suivante :

$$[i(0)]^{n-1/2} = \frac{[i(0)]^n + [i(0)]^{n-1}}{2} \quad (\text{II.17})$$

$$[i(l)]^{n-1/2} = \frac{[i(l)]^n + [i(l)]^{n-1}}{2} \quad (\text{II.18})$$

L'équation nodale en tension pour la première extrémité de la branche ($x = 0$) devient :

$$\left(\frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} \right) ([v(0)]^n) - \frac{[i(0)]^n}{\Delta x} = \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2} \right) [v(0)]^{n-1} - \frac{[i_1^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(0)]^{n-1}}{\Delta x} \quad (\text{II.19})$$

Et pour la deuxième extrémité ($x = l$), nous avons :

$$\left(\frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} \right) [v(l)]^n + \frac{[i(l)]^n}{\Delta x} = \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2} \right) [v(l)]^{n-1} + \frac{[i_{k_{max}+1}^{n-1/2}]}{\Delta x/2} - \frac{[i(l)]^{n-1}}{\Delta x} \quad (\text{II.20})$$

A partir des deux équations (II.19) et (II.20), nous pouvons déduire une écriture quadripolaire d'un tronçon de ligne (branche) dans le domaine temporel, qui sera comme suit [II.2]:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} & -\frac{[1_{2N}]}{\Delta x} & [0] & [0] \\ [0] & [0] & \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} & \frac{[1_{2N}]}{\Delta x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [v^n(0)] \\ [i^n(0)] \\ [v^n(l)] \\ [i^n(l)] \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2}\right) [v(0)]^{n-1} - \frac{[i_1^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(0)]^{n-1}}{\Delta x} \\ \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2}\right) [v(l)]^{n-1} + \frac{[i_{kmax}^{n-1/2}]}{\Delta x/2} - \frac{[i(l)]^{n-1}}{\Delta x} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{II.21})$$

II.2.4. Définition du vecteur inconnu [X]

Dans le système $[A].[X] = [B]$, le vecteur inconnu $[X]$ comprend les courants et les tensions aux nœuds des extrémités de la ligne.

L'utilisation du formalisme topologique $[A].[X] = [B]$ que nous venons de présenter pour la déduction des courants et tensions sur les deux nœuds des extrémités de la ligne à l'instant $t_n = n\Delta t$ nécessite la connaissance de ces mêmes grandeurs électriques à l'instant qui précède ($t_{n-1} = (n-1)\Delta t$). Pour cet objectif nous utilisons les équations de récurrences (II.15) et (II.16) obtenues après discrétisation par FDTD des équations des lignes.

III. Modélisation de l'effet couronne

Dans la modélisation de l'effet couronne, une approche courante consiste à considérer la décharge couronne comme une branche transversale groupée, insérée entre les sections de la ligne de transmission. Cette approche utilise un modèle de circuit équivalent et se base sur l'idée d'ajouter une capacité supplémentaire si la tension dans cette section est au-dessus de la tension de claquage couronne.

Cette augmentation de la capacité du conducteur est appelée "*capacité couronne*", et elle est due à la production de charges d'espace autour du conducteur. La valeur de cette capacité dépend de l'amplitude et de la forme d'onde du choc, ainsi que de la géométrie de la ligne.

Grâce à cette approche certains modèles sont basés sur des circuits simples comprenant une capacité couronne C_{co} dont les valeurs sont déterminées à partir d'expérimentations en laboratoire qui peut être facilement intégrée dans l'équation de récurrence (II.16) :

$$[v_k^n] = \left([C_{co}] \frac{\Delta x}{\Delta t} \right)^{-1} \left[\left([C_{co}] \frac{\Delta x}{\Delta t} \right) [v_k^{n-1}] - ([i_k^{n-1/2}] - [i_{k-1}^{n-1/2}]) \right] \quad (\text{II.22})$$

III.1. Caractéristiques générales de la décharge couronne Q-V

Dans l'analyse des surtensions, l'effet couronne est généralement considéré par les caractéristiques charge-tension (Q-V) utilisés pour décrire le phénomène de la décharge couronne (figure II.5).

Les caractéristiques couronne dans les lignes de transmission sont habituellement obtenues grâce à des mesures expérimentales. Il existe deux types de mesures de base:

1. *les courbes Q-V* : qui sont des fragments de charge en fonction de la tension,
2. *les mesures des ondes de tension* : qui se propagent le long d'une ligne de transmission.

Ces caractéristiques ont permis aux chercheurs de modéliser le phénomène de la décharge couronne. Les modèles ont été groupés en deux familles :

- Analogiques de circuiteries.
- Analytiques qui sont basés sur les propriétés physiques du phénomène.

Ces modèles décrivent mathématiquement la caractéristique Q-V suivante [II.4]:

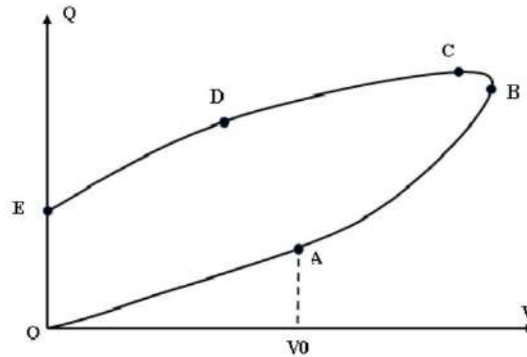


Figure II.5. Représentation schématique d'un cycle Q-V.

- Elle se présente sous forme d'un cycle d'hystérésis quand la tension croît jusqu'à sa valeur de crête puis décroît.
- La valeur critique V_0 de l'apparition de l'effet couronne est calculée en tenant compte de tous les paramètres physiques et les conditions atmosphériques dont dépend le phénomène.
- L'apparition de la décharge couronne et son développement ne commence qu'après avoir atteint le seuil critique V_0 . L'augmentation de la charge totale est due à l'injection d'une

charge additionnelle autour du conducteur, donc, la capacité du conducteur est augmentée. La pente de la section AB de la courbe Q-V, est une capacité dynamique C_{dyn} de la ligne.

- Il faut tenir compte de la dépendance de la quantité de charge émise durant l'activité couronne en fonction de l'amplitude et de la forme d'onde.
- Au point B, la tension $v(t)$ atteint sa valeur de crête puis commence à décroître, la charge q augmenté à sa valeur maximale au point C (approche du point B) et qui dépend de la raideur du front de tension.
- La tension $v(t)$ décroît du point C à zéro (point E). La charge q aussi décroît d'une manière presque parallèle au tronçon OA.
- La dissipation de l'énergie pendant l'activité couronne est représentée par la surface du cycle $Q - V$.

III.2. Différents modèles de l'effet couronne

Plusieurs modèles sont utilisés pour représenter l'effet couronne, telle que les modèles analogiques, analytiques et autres, où la capacité couronne, dû à l'injection de charges autour du conducteur est fonction de l'amplitude et de la forme d'onde de choc, ainsi que la géométrie de ligne [II.5].

III.2.1. Modèles analogiques

❖ Modèle proposé par Kudyan et Shih

Kudyan et Shih en 1981 se sont basés sur le modèle proposé par Wagner [II.5]-[II.6], avaient représentés un modèle couronne montré dans la figure II.6.

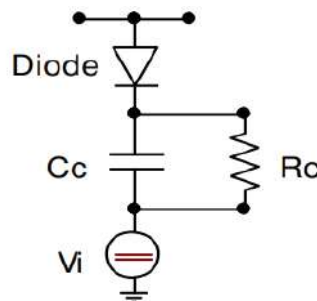


Figure II.6. Circuit couronne équivalent proposé par Kudyan et Shih.

Dans ce modèle, la résistance et la capacité représentent le processus des pertes d'énergie et le changement dans la capacité de la ligne. La source DC dans ce circuit représente la tension d'apparition couronne. Il est à noter que ce modèle a été proposé au début par Wagner (Figure II.7).

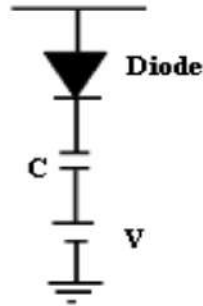


Figure II.7. Modèle proposé par Wagner.

❖ Modèle proposé par Lee.

En 1983 Lee [II.7] avait développé un modèle non-linéaire figure II.8. Ce modèle était utilisé pour décrire la propagation des surtensions sur les lignes aériennes pour la géométrie du conducteur au-dessus du sol. Pour ce modèle l'auteur a introduit la loi quadratique des pertes couronne proposée par Peek [II.5].

$$V_{iR} = K_R (v - v_c)^2 \quad (\text{II.23})$$

$$K_R = \sigma_G \sqrt{\frac{r}{2h}} 10^{-11} \quad (\text{II.24})$$

$$I_R = K_R \frac{(v - v_c)^2}{v} \quad (\text{II.25})$$

σ_G : La constante des pertes couronne.

v_c : La tension d'apparition couronne.

K_R : est un coefficient des pertes couronne en [S/m]

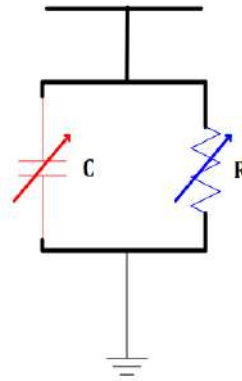


Figure II.8. Modèle proposé par Lee.

❖ **Modèle proposé par Correia de Barros.**

En 1994 Correia de Barros et Célia de Jesus [II.8], montrent que ce modèle est suffisant pour l'évaluation de l'atténuation et distorsion dans la propagation d'onde sur les lignes de transmission due à la décharge couronne et cela en beau temps et sous pluie. Les travaux de recherche munis par ces chercheurs montrent que l'effet couronne peut être vue comme un générateur dynamique de charge d'espace déclenchée sur la tension critique figure II.9.

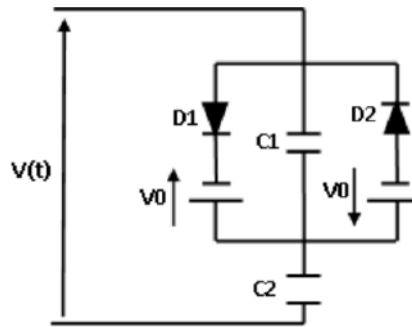


Figure II.9. Modèle proposé par Correia de Barros.

En 2003, une étude comparative [II.9], qui introduit deux modèles (de Wagner, Garry et al) conduit à une bonne concordance entre les deux modèles. Cependant la capacité couronne présentée par Garry et al [II.10], est définie comme suit :

$$C_c = C_0 \eta (v_c/v)^{\eta-1} \quad (\text{II.26})$$

C_0 : La capacité géométrique de la ligne.

v_c : La tension de seuil pour l'apparition de l'effet couronne.

η : Un coefficient, pour un seul conducteur (formule expérimentale) :

$$\eta = 0.22 r + 1.2 \quad (\text{II.27})$$

❖ Modèle proposé par Motoyama et al.

Motoyama et al en 1987 [II.11], proposaient un modèle linéaire de la décharge couronne présenté par la figure II.10. Composé des circuits R-C et des diodes pour un système triphasé, Ce modèle n'est pas valable pour les chocs de foudre puisqu'il présente des oscillations numériques importantes. Ce modèle est jugé insuffisant pour l'étude de la propagation des phénomènes transitoires sur les lignes de transport [II.5].

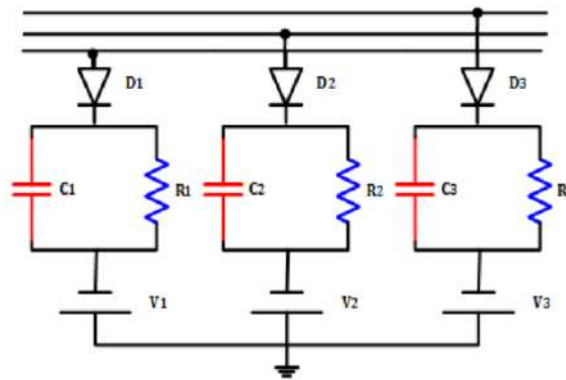


Figure II.10. Modèle proposé par Motoyama et al.

❖ Modèle proposé par Santiago et Castellanos

Santiago et Castellanos [II.12] ont proposé un circuit qui comprend une résistance non linéaire comme le montre la figure II.11. L'addition du non linéarité permet une meilleure représentation des constantes de temps associées à l'avalanche électronique et aux écoulements d'ions.

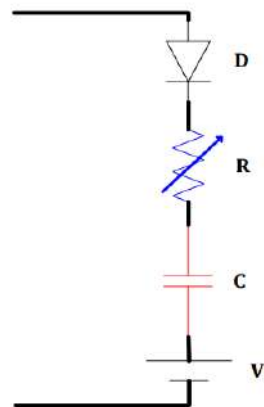


Figure II.11. Modèle proposé par Santiago et Castellanos.

❖ Modèle proposé par Portela

Portela [II.13] affirme que des résistances en série $R1'$ et $R2'$ sont nécessaires pour présenter la dissipation d'énergie lors de l'apparition de la décharge couronne tandis que $R1$, $R2$, ensemble avec $C1$ et $C2$, peuvent être utilisés pour représenter l'atténuation de l'ionisation (les pertes couronnes). Les éléments $D1$ et $D2$ se sont des diodes, permettent également de circuler un courant dans le sens inverse afin de tenir compte de certaines charges pouvant revenir au conducteur (figure II.12).

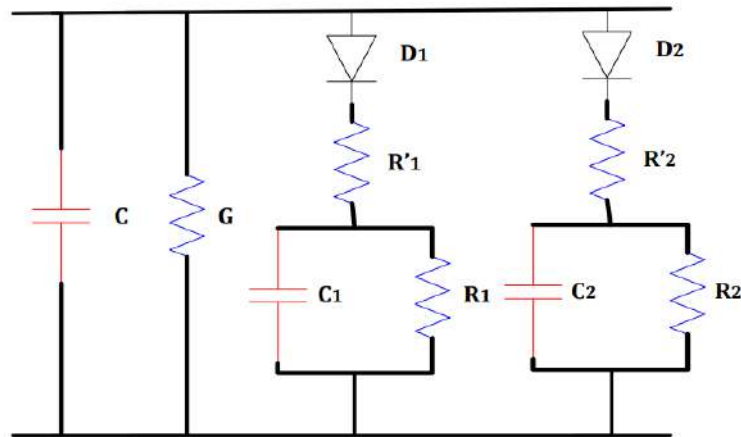


Figure II.12. Modèle proposé par Portela.

III.2.2. Modèles analytiques

Ce type de modélisation décrit l'effet couronne par un circuit composé d'un élément non-linéaire qui approxime les courbes $Q-V$ expérimentales.

III.2.2.1. Modèles statiques

Les modèles statiques sont basées sur la simulation de courbe $Q-V$ par linéarisation de ses différentes parties. En 1989, un travail de [II.14], présentent un modèle basé sur la simulation de la courbe charge-tension (Figure II.13) par linéarisation de ses différentes parties.

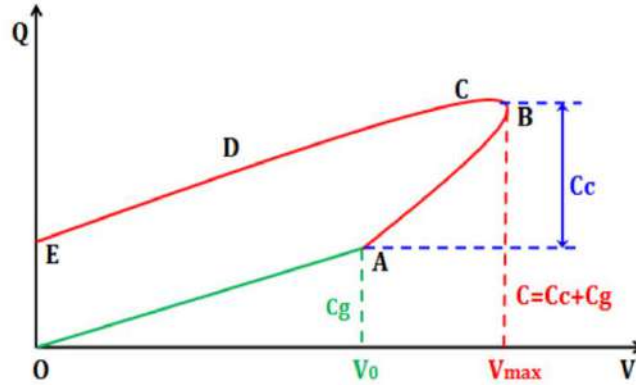


Figure II.13. Représentation schématique d'un cycle Q-V.

La méthode adoptée dans la modélisation est de représenter les cycles de charge-tension par des segments linéaires, sachant que chaque partie correspond à une phase particulière du développement du mécanisme couronne transitoire [II.14].

- **Le segment « OA »** où $V < V_0$: l'effet couronne est absent et la pente donne la capacité géométrique C_g de la ligne.
- **Dans la partie « ABC »**, les processus d'ionisation débutent, les parties « AB » et « BC » représentent les capacités dynamiques (couronne).
- **Le côté « CDE »** représente la décroissance de tension à la queue d'onde, ces pentes représentent des capacités supérieures à la capacité géométrique C_g .

III.2.2.2. Modèles dynamiques

Une approche alternative et générale, incluant la décharge couronne à travers un générateur de courant commandé en tension en parallèle avec la capacité géométrique des conducteurs. Par conséquent, l'équation de récurrence (II.16) deviendrait la suivante :

$$\bullet \quad k = 2, \dots, k_{max}$$

$$[v_k^n] = \left([C] \frac{\Delta x}{\Delta t} \right)^{-1} \left[\left([C] \frac{\Delta x}{\Delta t} \right) [v_k^{n-1}] - ([i_k^{n-1/2}] - [i_{k-1}^{n-1/2}]) + [i_k^{n-1/2}]_{co} \right] \quad (\text{II.28})$$

où

$[i_k^{n-1/2}]_{co}$: représente le vecteur des courants transversaux sortant de chaque conducteur en raison de la décharge couronne.

Plusieurs modèles différents de l'effet couronne disponibles dans la littérature ont été établis pour simuler l'effet couronne grâce aux équations des lignes par FDTD. En particulier, parmi la grande variété de modèles, Nous allons citer du modèle de *Suliciu*, le modèle de *Gary* et le modèle de *Malik* [II.15]-[II.16]-[II.17].

Nous notons que les modèles empiriques de *Gary* et *Suliciu* font partie des modèles les plus largement appliqués dans la littérature, tandis que le modèle de *Malik* est considéré comme première reproduction de phénomène à partir de considérations physiques.

Dans la présente section, un bref aperçu de ces modèles, ainsi que la description des équations pour calculer i_{co} à travers chaque modèle sera effectuée.

❖ Modèle de Suliciu

Le modèle proposé par Suliciu en 1981 [II.15], est un modèle mathématique, basé sur l'observation de la courbe Q-V.

Dans le modèle de Suliciu, le courant couronne est donné par :

$$i_{co} = \frac{dq_c}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{si } g_2 \leq 0 \\ g_2 & \text{si } g_1 \leq 0 \\ g_1 + g_2 & \text{si } 0 \leq g_1 \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

$$\text{Où : } \begin{cases} g_j = k[(C_j - C_0)(v(t) - v_j) - q_c] , & j = 1, 2 \\ \text{et} \\ C_2 > C_1 > C_0, V_1 \geq V_2, & k_1, k_2 > 0 \end{cases}$$

i_c et q_c sont le courant [A] et la charge couronne [C].

Ces paramètres sont déterminés par la concordance avec les courbes Q-V mesurées sur des conducteurs sujets à des chocs de tension [II.18].

❖ Modèle de Gary

Une première approximation de la non-linéarité du phénomène de la décharge couronne est la représentation linéaire par parties proposée par Gary et al. [II.16], qui correspond à la description mathématique du modèle analogique de Wagner.

$$C_{cor} = \begin{cases} C_0 & v \leq v_c, & \partial v / \partial t > 0 \\ C_0 \beta \left(\frac{v}{v_c}\right)^{\beta-1} & v > v_c, & \partial v / \partial t > 0 \\ \beta = 0.22 r_c + 1.2 & & \\ C_0 & & \partial v / \partial t \leq 0 \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

v : est la tension appliquée au conducteur,

v_c : est obtenue par la formule de Peek ou par une expression similaire.

C_0 : est la capacité naturelle ou géométrique du conducteur,

r_c : est le rayon du conducteur en centimètre

β : dépend du nombre des conducteurs par faisceau et de la polarité de la tension.

❖ Modèle de Malik

Ce modèle adopte une description simplifiée et macroscopique des mécanismes physiques sous-jacents au phénomène couronne.

Dans ce modèle [II.17], tant que la tension est supérieure à v_c , le comportement dynamique de l'effet couronne est simulé par une *augmentation apparente du rayon du conducteur* r_0 , qui est remplacé par le rayon $r_c \geq r_0$. Cette dernière correspond à la limite extérieure de l'ensemble de la charge d'espace autour du conducteur.

La charge totale en fonction du temps est donnée par [II.19]:

$$Q(t) = 2 \pi \varepsilon_0 \alpha E_c r_c(t) \frac{2h - r_c(t)}{2h} + C_0 V(t) \quad (\text{II.31})$$

Où ε_0 est la permittivité du vide, et le rayon r_c en présence de l'effet couronne peut être déterminé en résolvant l'équation non linéaire suivante à chaque instant « t » :

$$r_c(t) \left\{ 1 + \frac{2h - r_c(t)}{2h} \ln \left[\frac{2h - r_c(t)}{r_c(t)} \right] \right\} = r_0 + \frac{V(t)}{\alpha E_c} \quad (\text{II.32})$$

Le courant de la couronne i_{co} supplémentaire dans l'équation (II.28) est déduit à partir de la dérivée temporelle de la charge q totale dans l'équation (II.31):

$$i_t(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{dq}{dv(t)} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{dq}{dv(t-\tau)} \frac{dv(t-\tau)}{dt} \quad (\text{II.33})$$

Considérant r_c dans l'équation (II.32) comme une fonction de $v(t - \tau)$, c'est-à-dire, $r_c = r_c(t - \tau)$, le courant de la décharge couronne i_{co} pour $dv(t)/dt > 0$ est calculé à partir des équations (II.31) -(II.33) comme suit :

$$i_{co} = \frac{2 \pi \varepsilon_0}{\ln \frac{2h - r_c(t)}{r_c(t)}} \frac{dv(t)}{dt} - C_0 \frac{dv(t-\tau)}{dt} \quad (\text{II.34})$$

Références bibliographiques

- [II.1] Jean-Jacques Morf, M. Aguet, « ENERGIE ÉLECTRIQUE », Traité d'Electricité volume XII Collection : Traité d'Électricité. EPFL Press, 2^e édition, 2013.
- [II.2] S. Kaouche, Analyse de Défauts dans un Réseau de Lignes ou de Câbles. Thèse de doctorat, Université de Jijel, Algérie. 2007.
- [II.3] C. R. Paul, "Analysis of Multiconductor Transmission Lines". John Wiley and Sons, 1989.
- [II.4] A. Semlyca, H. Wei-Gang, 'Corona modelling for the calculation of transients on transmission lines', IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No.3, pp.228-239, 1986.
- [II.5] F. Castellanos, 'Full frequency- dependent phase-domain modeling of transmission lines and corona phenomena', PHD. Thesis, University. British. Columbia, 1997.
- [II.6] H. M. Kudyan, C. H- Shih, 'A nonlinear circuit model for transmission lines in corona', IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS100, No. 3, pp.1420-1430, 1981.
- [II.7] K.C. Lee, B.C. Hydro, 'Non-linear corona models in an electromagnetic transients program (EMTP)', IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. -PAS-102, No. 9, pp. 2936-2942, 1983.
- [II.8] C. de Jesus, C. de Barros, 'Modelling of corona dynamics for surge propagation studies', IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, pp. 1564-1569, 1994.
- [II.9] S. Herdemet M.S. Mamis, 'Computation of corona effects in transmission lines using state-space techniques', Computation and Electrical Engineering, pp.603-611, 2003.
- [II.10] M. Mohammadi, B. Vahidi, 'Model of Corona for Transient Study', Department of Electrical Engineering Amirkabir, University. Technology Tehran-Iran, 2009.
- [II.11] M. Hideki, A. Akihiro, "Development of a Linear Model for Corona Wave Deformation and its Effects on Lightning Surges", Electr. Engine.in Japan, Vol. 107, N°. 2, pp 155-162, 1987.
- [II.12] N. Santiago, F. Castellanos, "Physical Aspects of Corona Effect During Transient Overvoltages and Their Simulation with Circuit Models", Proc. IASTED. Power Syst. Engine. pp. 9-14, 1992.
- [II.13] C. Portela, "Regimes Transitorios", (In portuguese). Vol. 2. COPPE/UFRJ. Brazil, 1983.
- [II.14] M. Al-Tai, H. S. B. Elyyan, D. M. German, A. Haddad, N. Harid, R. T. Waters, 'The simulation of surge corona on transmission lines', IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No.2, pp. 1360-1368, 1989.

[II.15] M. M. Suliciu, I. Suliciu, 'A rate type constitutive equation for the description of the corona effect', IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 8, pp. 3681-3685, 1981.

[II.16] C. Gary, G. Dragan, D. Cristescu, "Attenuation of Travelling waves caused by Corona", CIGRE Report 33-13, 1978.

[II.17] Li, X.R., Malik, O.P., Zhao, Z.D.: A practical mathematical model of corona for calculation of transients on transmission lines. *IEEE Power Eng. Rev.* **9**(4), 75– 75 (1989).

[II.18] L. Hofmann, B. R. Oswald, 'Line model in the time domain considering frequency dependent parameters, leakance and corona', 14 PSCC, Sevilla, Session. 35, Paper. 3, 2002.

[II.19] Stracqualursi, E., Araneo, R., Andreotti, A.: The impact of different corona models on FD algorithms for the solution of multiconductor transmission lines equations. *High Volt.* **6**(5), 822–835, 2021. <https://doi.org/10.1049/hve2.12143>.

Chapitre III

Applications et Discussions des Résultats

I. Introduction

Dans ce dernier chapitre nous présentons quelques applications dans le but d'examiner les concepts et les modèles théoriques que nous avons exposé dans le chapitre précédent. Nous commençons par une validation de nos résultats de simulations en les comparants avec ceux issus du formalisme topologique $[A].[X]=[B]$ en temporel.

Nous proposons par la suite une étude comparative des différents modèles théoriques déjà existant dans la littérature [III.1]-[III.2] qui permettent le calcul de l'effet couronne dans les lignes électriques, nous complétons notre travail par une étude paramétrique qui porte sur les paramètres influençant le phénomène de la décharge couronne :

- Le courant de foudre injecté (raideur du front d'onde de foudre).
- Les caractéristiques du sol (Conductivité σ du sol).
- La hauteur h du conducteur par rapport au sol.
- Le rayon r_0 du conducteur.

II. Validation et discussion des résultats

Le but de cette partie est de valider les concepts théoriques que nous avons exposé dans le chapitre précédent. Nous commençons par le concept qui décrit les caractéristiques des coques de charge (Q-V) par effet couronne, Afin de retrouver les résultats publiés dans littérature nous reprenons les mêmes paramètres utilisés dans [III.3].

Nous considérons une ligne électrique monophasée portée à une hauteur de $h = 7.5$ m d'un sol de conductivité finie $\sigma = 0.01$ S/m, le rayon de conducteur $r_0 = 1.32$ cm, et la longueur $l = 15$ km, (figure III.1). les impédances aux extrémités sont: $Z_s = 1 \mu\Omega$, $Z_l = Z_c \simeq 543 \Omega$.

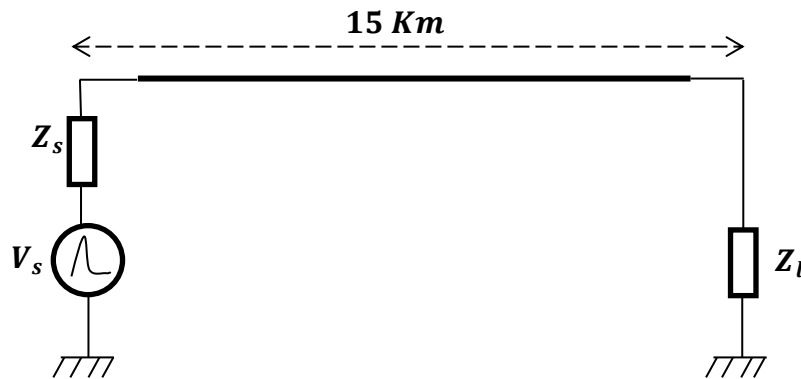


Figure III.1. Configuration de la ligne électrique étudiée.

La ligne est alimentée par un générateur de tension de forme bi-exponentielle (figure III.2-figure III.3) exprimée par : $V_t(t) = V_0(\exp(-at) - \exp(-\beta t))$

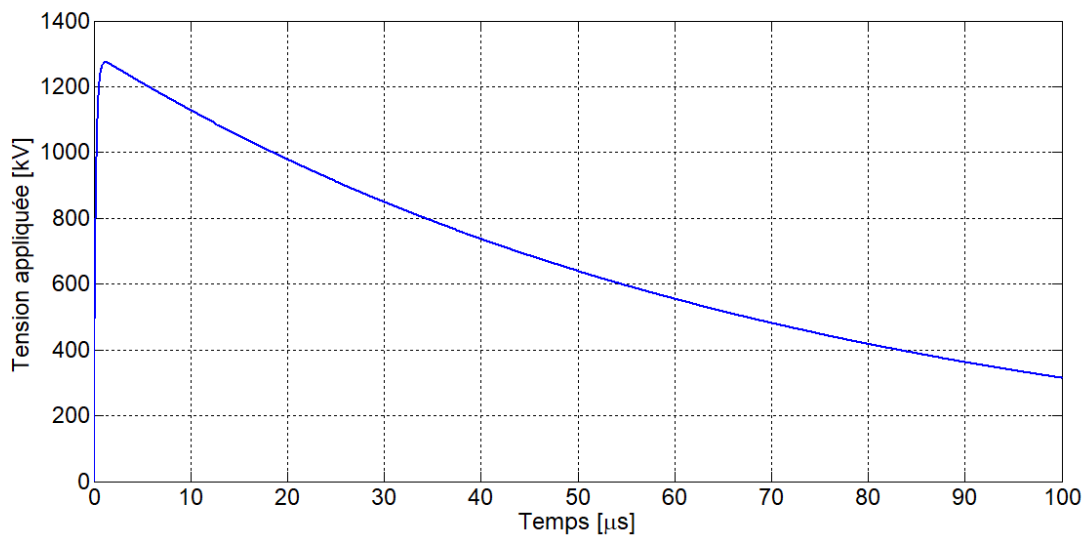


Figure III.2. Signal appliqué 1300 kV, (1.2 /50) μs.

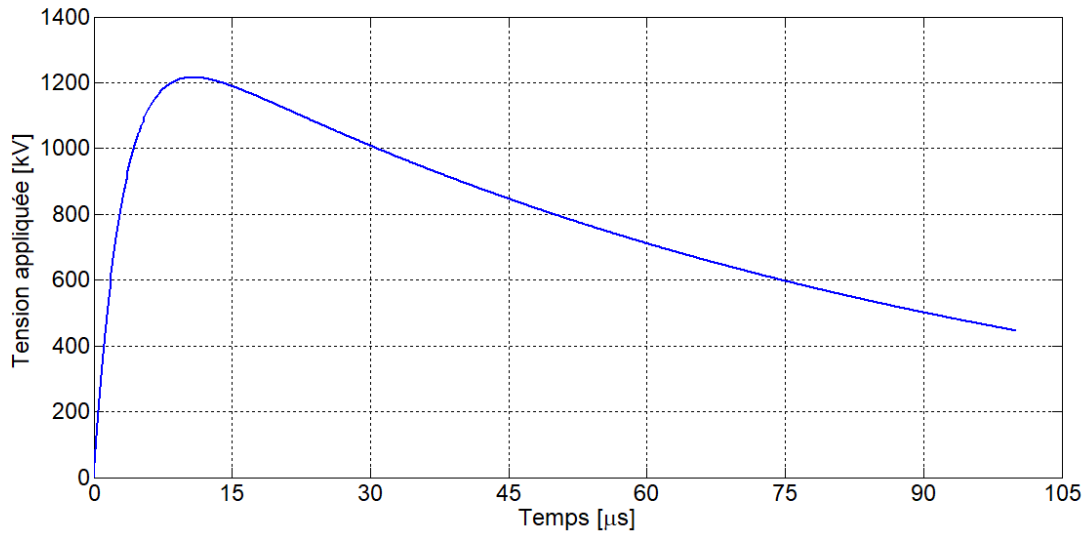
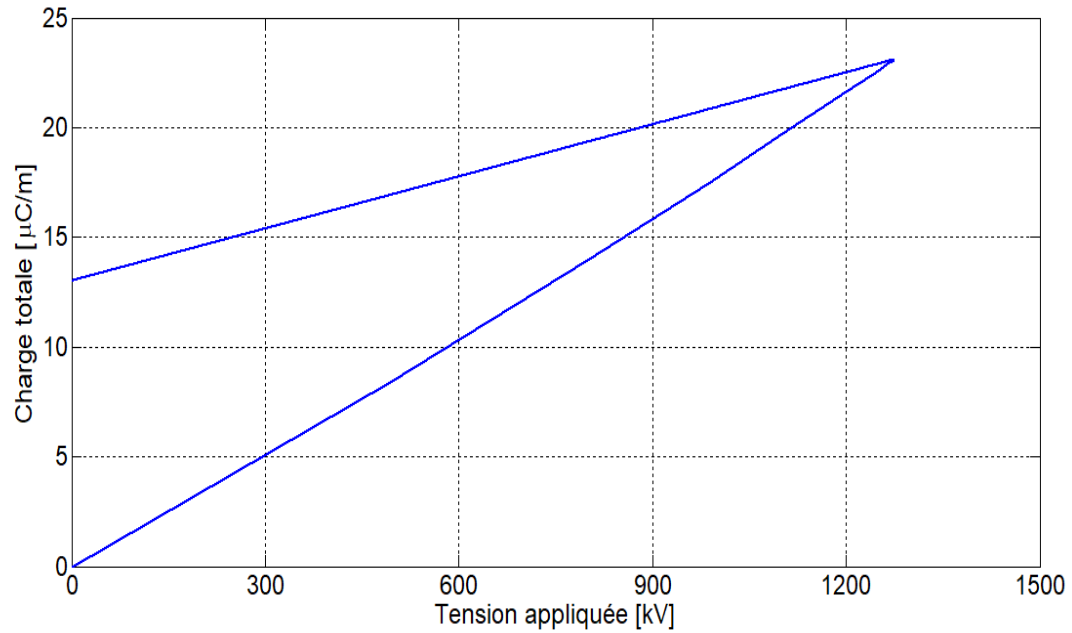


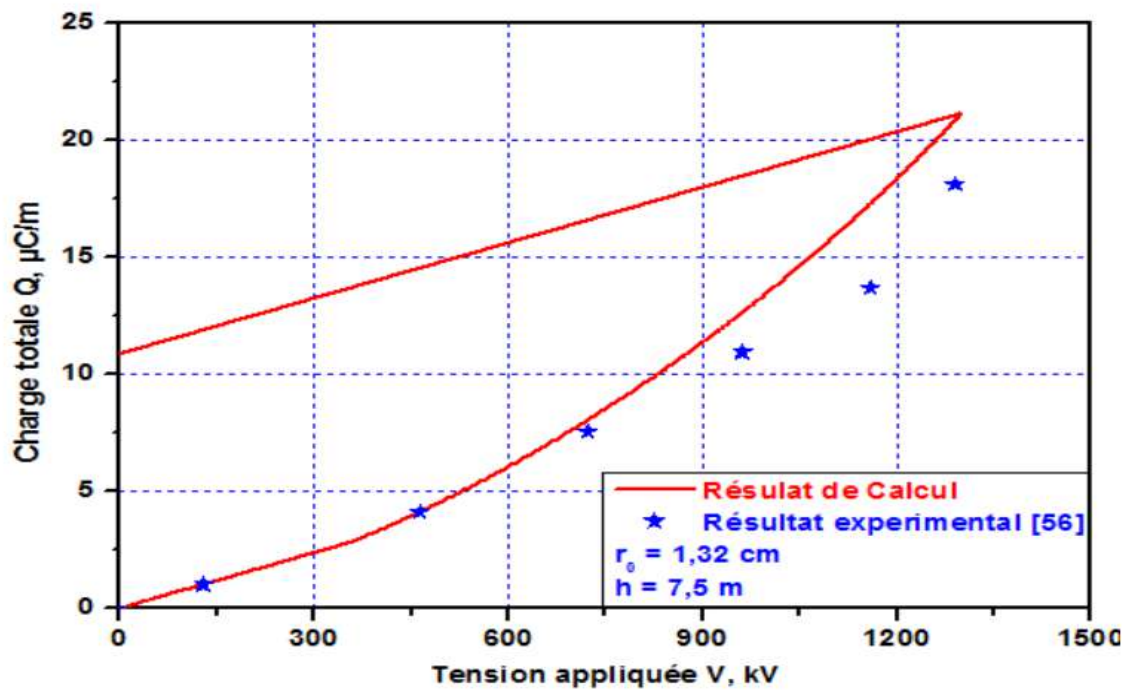
Figure III.3. Signal appliqué 1230 kV, (10 /75) μs.

Les résultats en figures III.4 et III.5 illustrent la caractéristique $Q = f(V)$ communément appelée coque de charge :

II.1. Caractéristique charge – tension (Q-V)

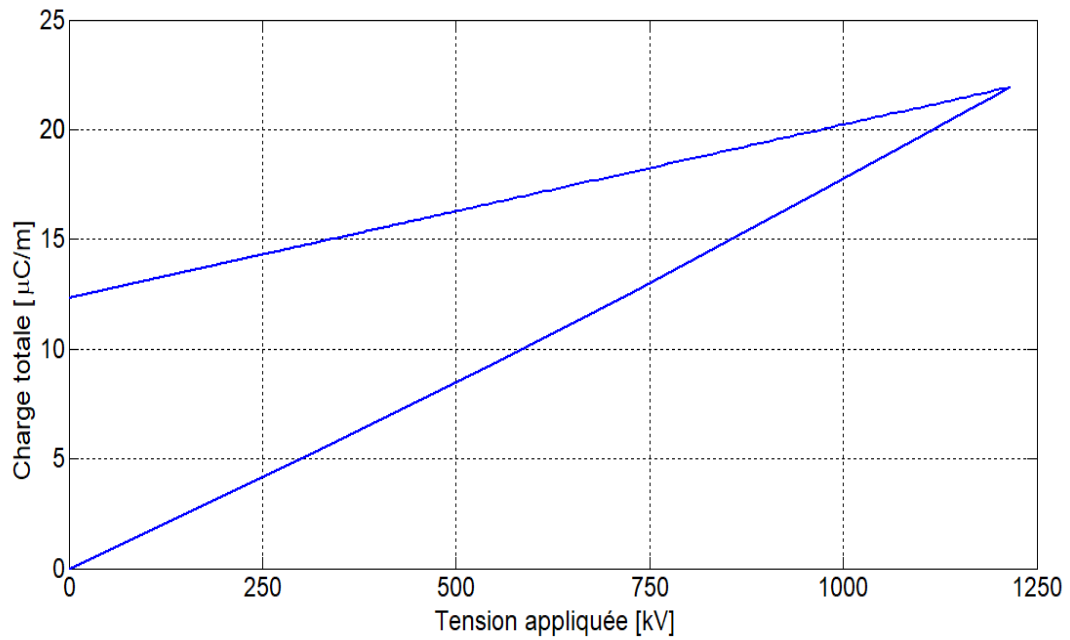


a. Résultat de nos calculs.

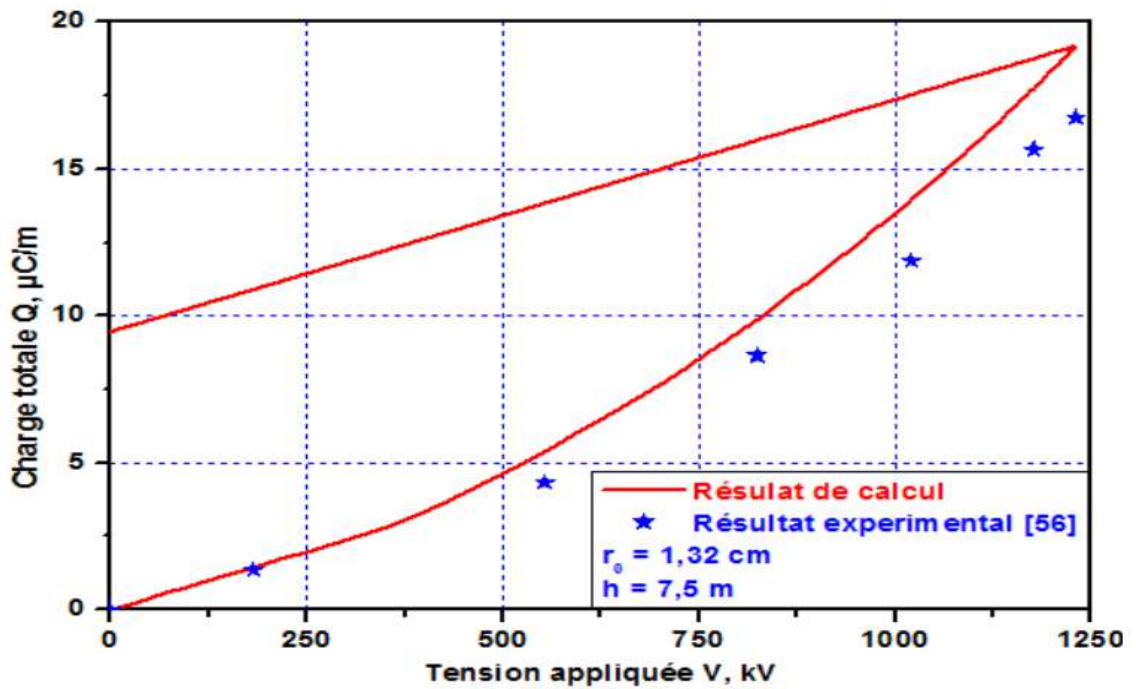


b. Résultat publié [III.3].

Figure III.4. Caractéristique Q-V 1300, 1.2 /50 µs.



a. Résultat de nos calculs.



b. Résultat publié [III.3].

Figure III.5. Caractéristique Q-V 1230, 10 /75μs.

Nous remarquons que nos résultats de simulation sont en bonne concordance avec ceux publiés [III.3] ; l'ordre de grandeur et l'allure générale sont conservés. Nous notons une progression linéaire de la charge suivi par un comportement non linéaire en fonction de la tension dès l'apparition de l'effet couronne et cela jusqu'à atteindre la valeur max de la tension puis commence une descente linéaire avec la diminution de la tension.

III. Etude paramétrique

Le but de cette application est de mettre en exergue l'effet des paramètres physique (tension appliquée) et géométriques (hauteur et rayon) sur la décharge couronne. Nous nous intéressons dans cette étude aux coques de charge, la capacité couronne ainsi que le rayon des coques couronne.

III.1. Effet de front d'onde

III.1.1. Calcul des coques de charge

Nous avons étudié trois signaux avec même amplitude $V_0 = 1300$ kV et des temps de montés différents : (1.2/50 μ s), (5/50 μ s) et (10/75 μ s) en (figure III.6). $V_c = 263$ kV, $h = 7.5$ m, $r_0 = 1.32$ cm.

La figure III.7 illustre la variation des coques de charge en fonction du signal appliqué (front d'onde).

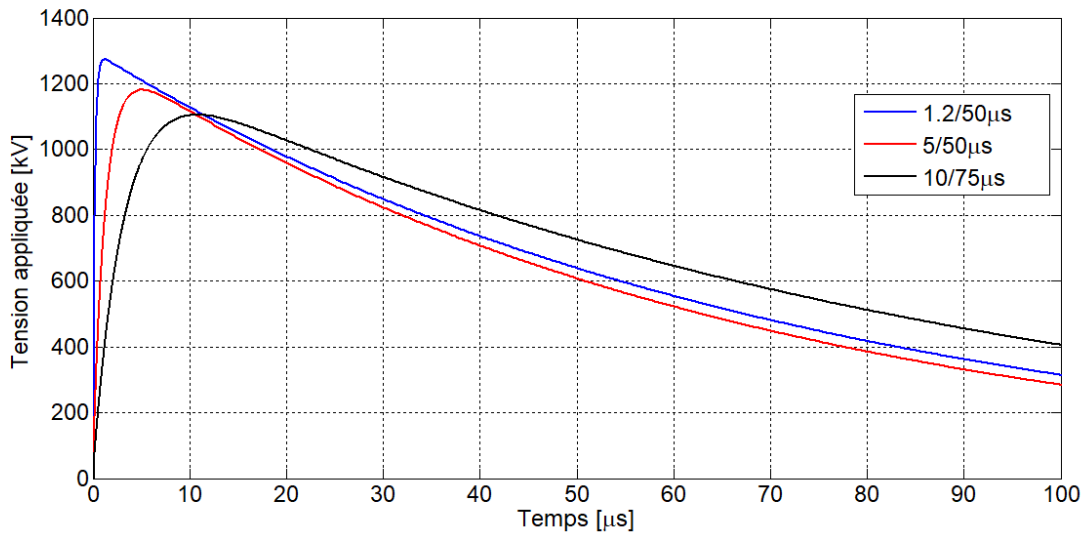


Figure III.6. Signaux d'excitation.

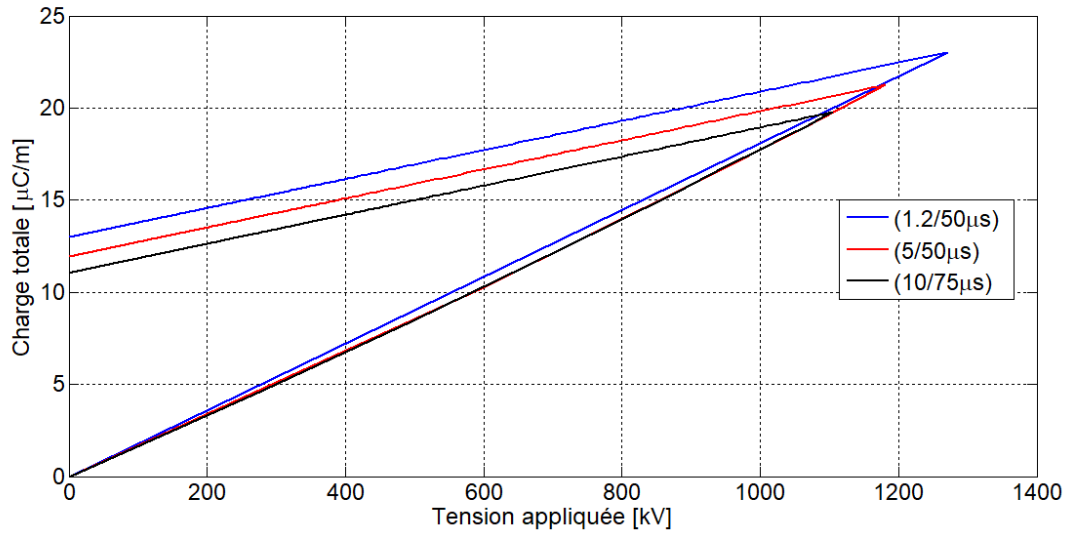


Figure III.7. Caractéristique Q-V.

III.1.2. Calcul de la variation de la capacité couronne

Nous nous intéressons dans cette application à l'étude de la capacité couronne en fonction de la tension appliquée ; 1300 kV, (10 /75 µs), (1.2/50µs) et (5/50µs).

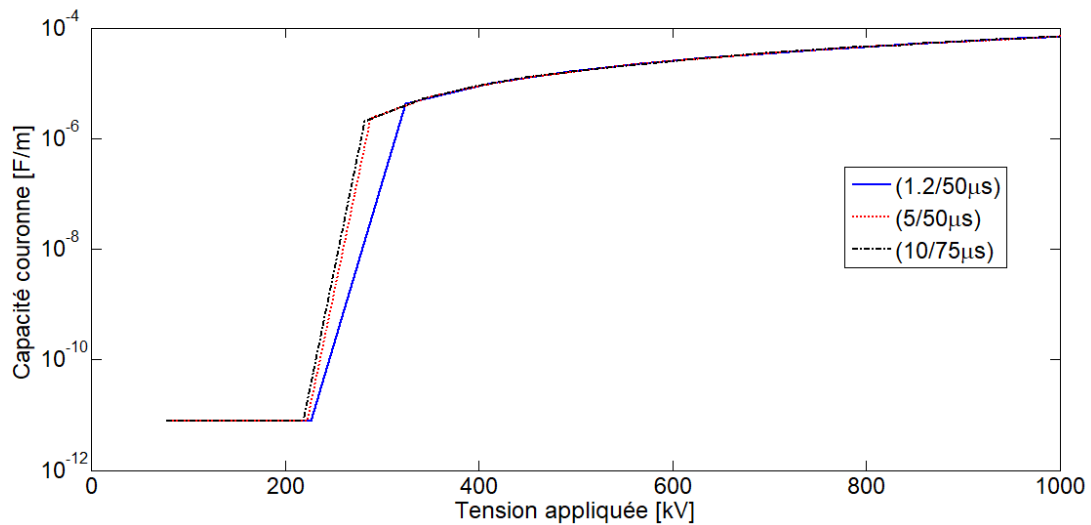


Figure III.8. Capacité couronne en fonction de la tension appliquée.

III.1.3. Calcul du rayon des coques couronne

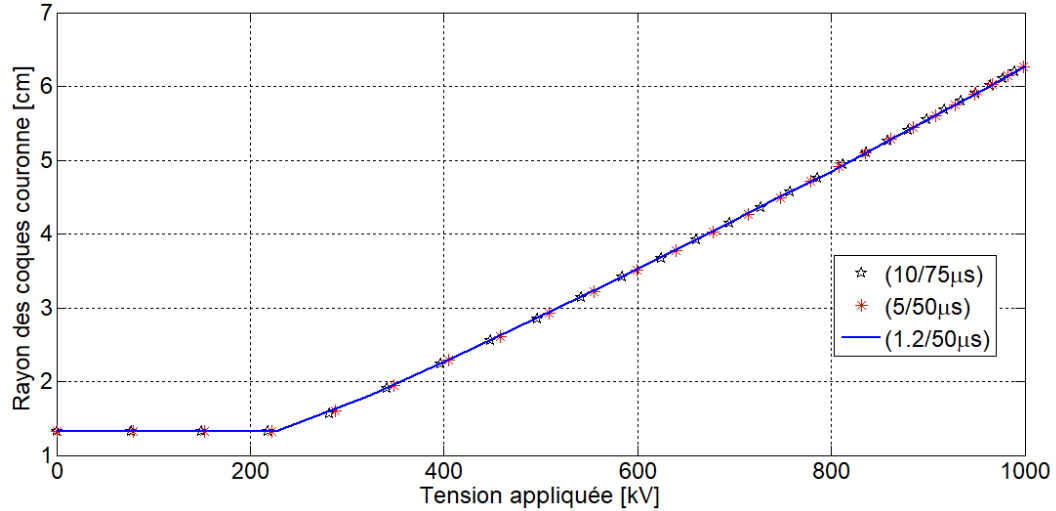


Figure III.9. Rayon des coques couronne en fonction de la tension appliquée.

Les résultats en figures III.7, III.8 et III.9 pour les coques de charge, le rayon des coques couronne et la capacité couronne respectivement illustrent l'effet du front d'onde sur décharge couronne, en effet un signal avec front plus raide (plus rapide) se traduit par un cycle de charge plus large (figure III.7) et des pertes plus importantes (surface du cycle). La capacité couronne et le rayon des coques ne sont pas très affectée par la rapidité du signal.

III.2. Effet de la hauteur h

III.2.1. Calcul des coques de charge

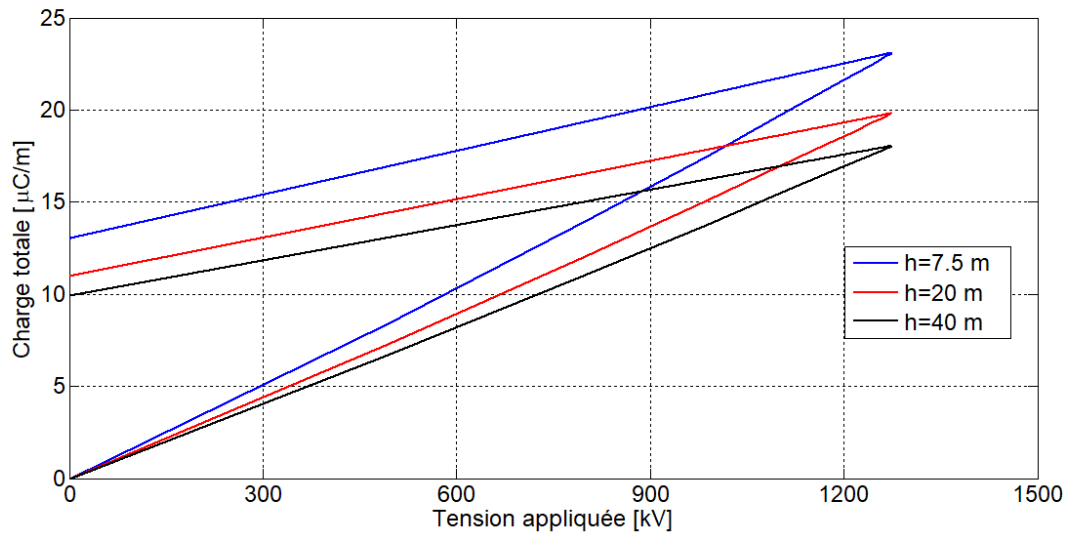


Figure III.10. Charge en fonction de la tension appliquée : Effet de la hauteur h .

III.2.2. Calcul de la variation de la capacité couronne

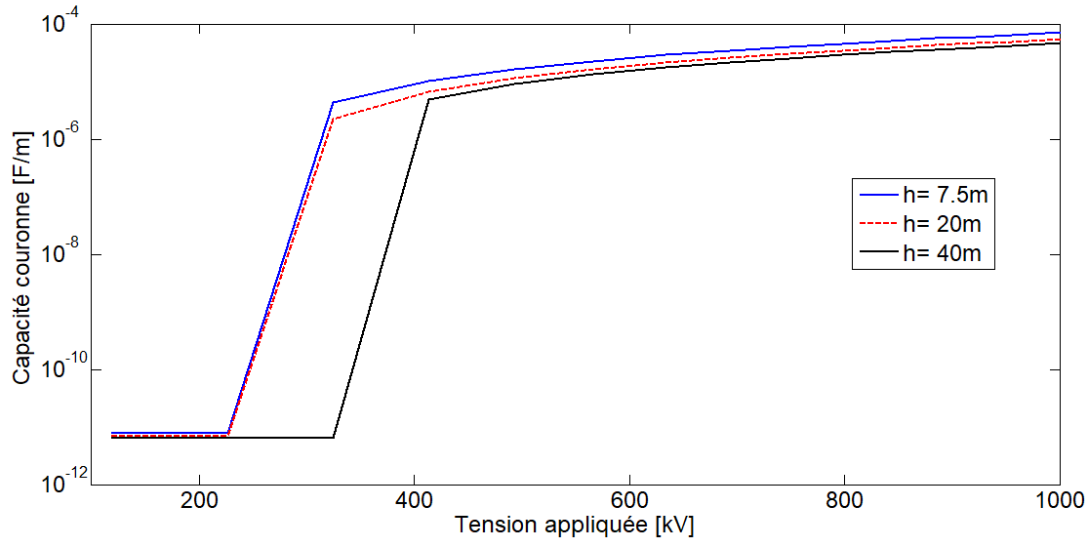


Figure III.11. Capacité en fonction de la tension appliquée : Effet de la hauteur h .

III.2.3. Calcul de rayon des coques couronne

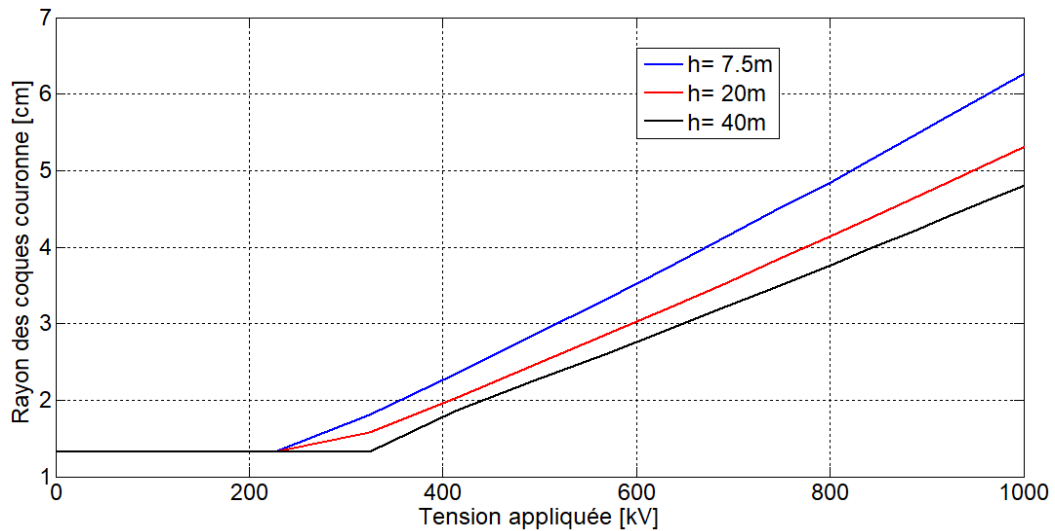


Figure III.12. Rayon en fonction de la tension appliquée : Effet de la hauteur h .

Nous remarquons que la hauteur de conducteur alimenté par rapport au sol à un effet certain sur la tension critique de l'apparition de l'effet couronne ($V_c = 263 \text{ kV}$ pour $h = 7.5\text{m}$, $V_c = 300 \text{ kV}$ pour $h = 20\text{m}$ et $V_c = 326 \text{ kV}$ pour $h = 40\text{m}$) ce qui se répercute les coques de charge, la capacité couronne et le rayon des coques figures III.10, III.11 et III.12 respectivement.

III.3. Effet du rayon de conducteur

III.3.1. Calcul des coques de charge

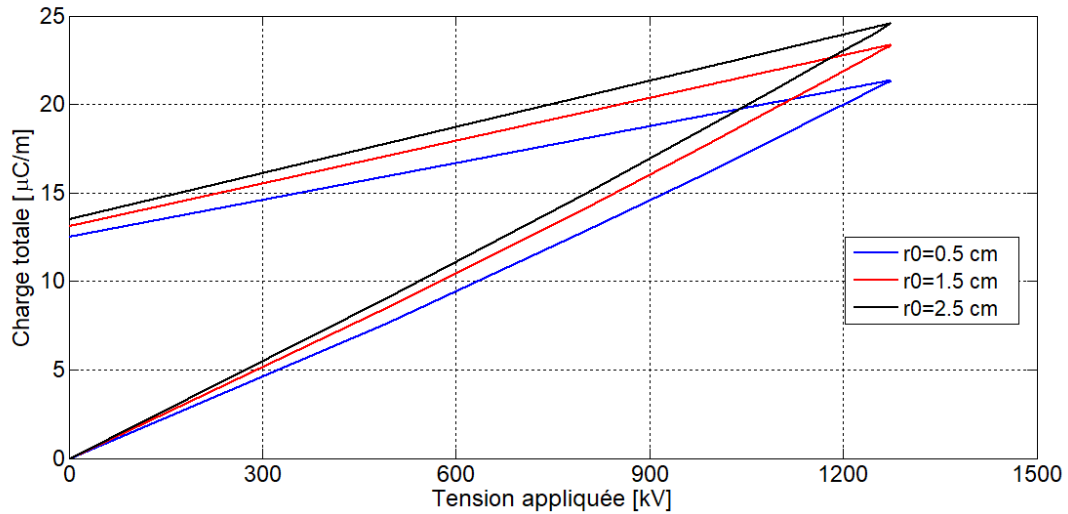


Figure III.13. Charge en fonction de la tension appliquée : Effet de rayon.

III.3.2. Calcul de la variation de la capacité couronne

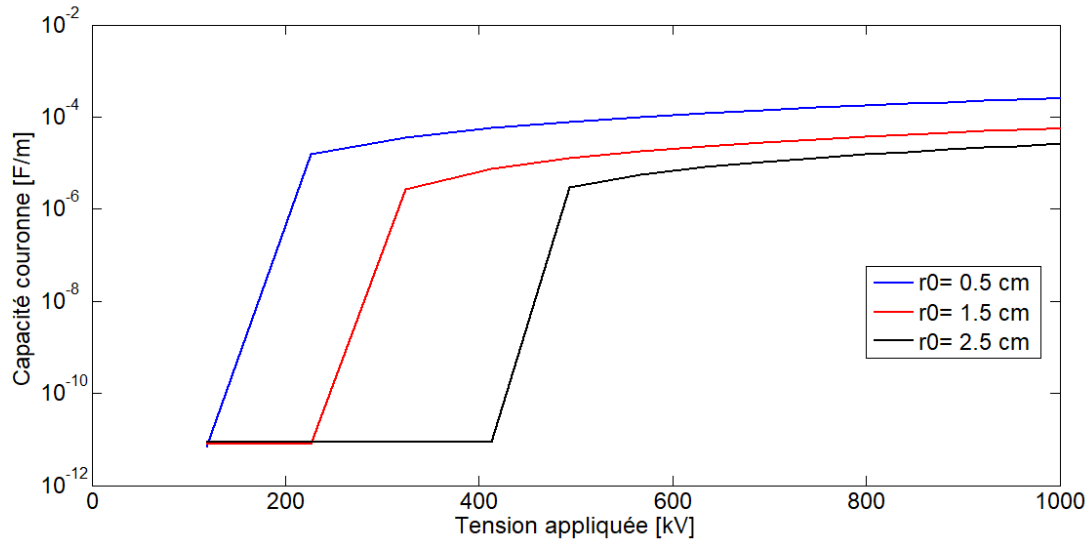


Figure III.14. Capacité en fonction de la tension appliquée : Effet de rayon.

III.3.3. Calcul de rayon des coques couronne

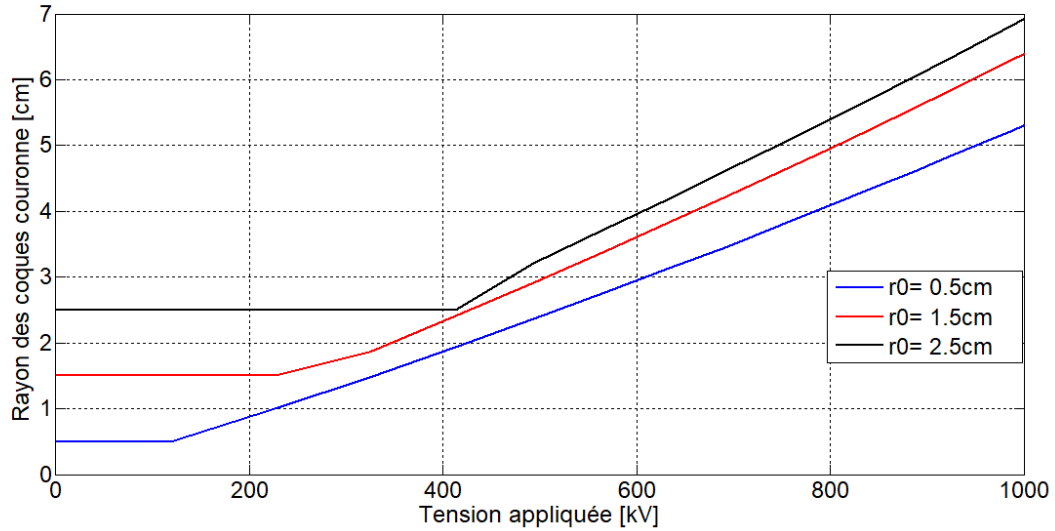


Figure III.15. Rayon des coques en fonction de la tension appliquée : Effet de rayon.

Nous rappelons que la tension appliquée est de type bi-exponentielle : $V_0 = 1300 \text{ kV}$; $(1.2/50\mu\text{s})$; le conducteur alimenté se trouve à une hauteur de $h = 7.5 \text{ m}$, le rayon et la tension critique sont $r_0 = 0.5 \text{ cm}$, $V_c = 128 \text{ kV}$, $r_0 = 1.5 \text{ cm}$, $V_c = 290 \text{ kV}$ et $r_0 = 2.5 \text{ cm}$, $V_c = 427 \text{ kV}$.

L'analyse des résultats en figures III.13, III.14 et III.15 pour la charge, la capacité et le rayon des coques de charges montre que la tension critique de l'apparition de l'effet couronne est proportionnelle au rayon de conducteur r_0 ce qui est prévisible théoriquement. En effet, cela peut constituer une première solution pour la réduction de l'effet couronne.

IV. Implémentation des modèles couronne par FDTD

IV.1. Validation

Dans cette partie nous nous intéressons à la validation des modèles théoriques décrivant l'effet couronne que nous avons implémenté dans les équations des lignes directement en temporel par FDTD.

Les données physiques et géométriques utilisés dans cette application sont comme suit (figure III.16): de $h = 28 \text{ m}$, le rayon de conducteur $r_0 = 1.58 \text{ cm}$, et la longueur $l = 15 \text{ km}$, conductivité finie du sol $\sigma = 0.01 \text{ S/m}$.

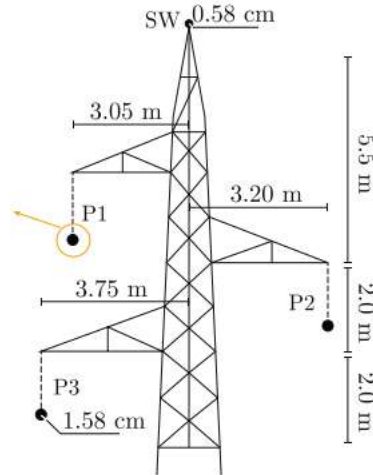


Figure III.16. Configuration du pylône électrique étudié.

Le conducteur de phase P1 est alimenté par un générateur de tension de forme Heidler :

$$V_t(t) = \frac{V_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \text{ Avec :}$$

$$\tau_1 = 0.63 \mu s, \tau_2 = 67.3 \mu s, V_c = 358.9 kV, V_0 = 2 * V_c \simeq 718 kV, \eta = 0.9$$

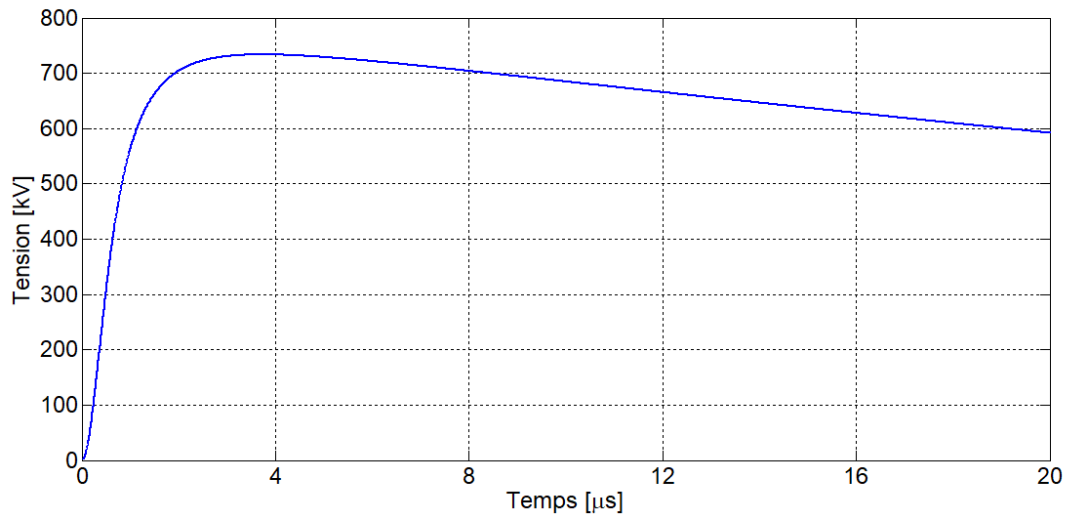
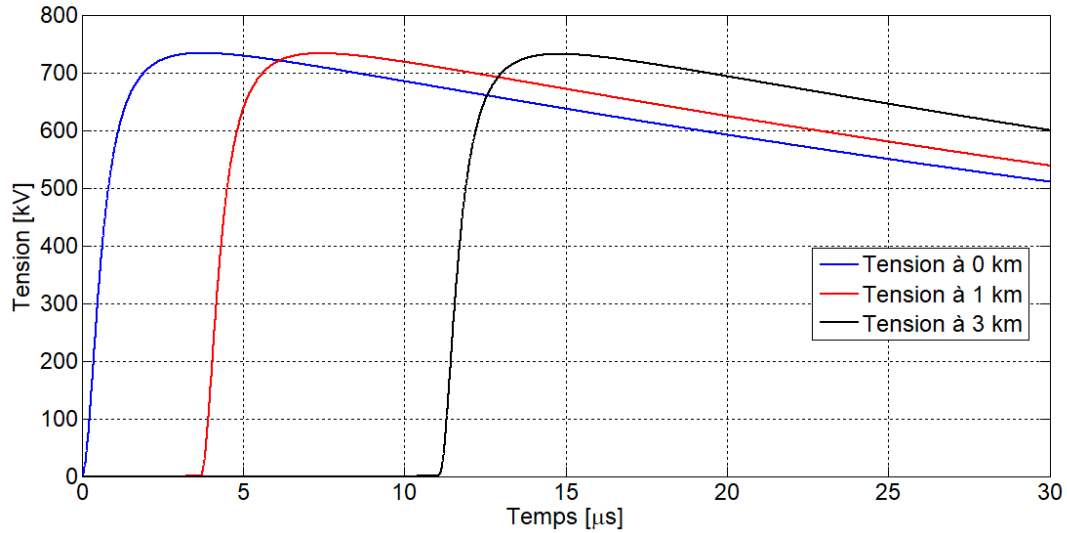


Figure III.17. Tension d'alimentation.

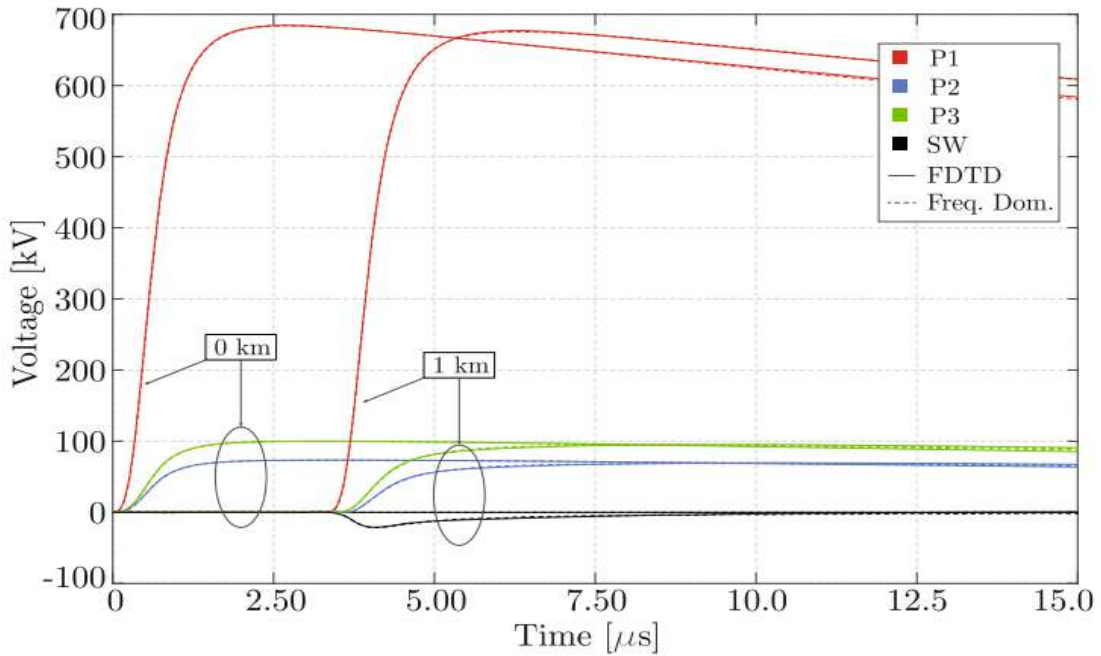
Nous proposons en figure III.18 le calcul de la tension en trois points différents de la ligne (0 km, 1 km et 3 km de la source), notre résultat obtenu après résolution des équations des lignes

par FDTD est comparé avec celui publié [III.4], ce dernier est issu par discrétisation des équations des lignes en utilisant le schéma de Crank-Nicolson.

IV.2. Cas d'absence de l'effet couronne



a. Résultat de nos calculs.



b. Résultat publié [III.4].

Figure III.18. Tension sur le conducteur alimenté : sans effet couronne.

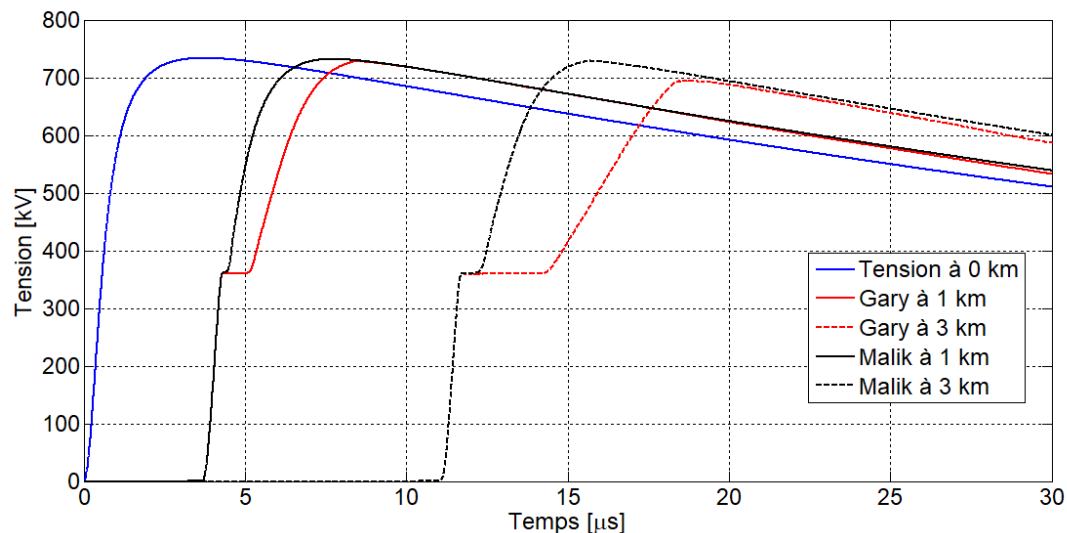
Nous remarquons une *très bonne concordance* entre nos résultats de calculs et ceux publiés [III.4], *l'ordre de grandeur et l'allure générale sont conservés*. Nous rappelons que notre concept de calcul est basé sur la discrétisation des équations des lignes par FDTD et la résolution d'un système $[A].[X]=[B]$ que nous avons détaillé dans le chapitre précédent, tandis que le résultat publié en [III.4] est obtenu par un schéma de discrétisation de Crank-Nicolson.

Nous signalons que les paramètres linéiques longitudinaux sont calculés en utilisant le concept du plan fictif complexe que nous avons jugé acceptable pour des signaux ayant un contenu spectral qui ne dépasse pas les quelques méga Hertz.

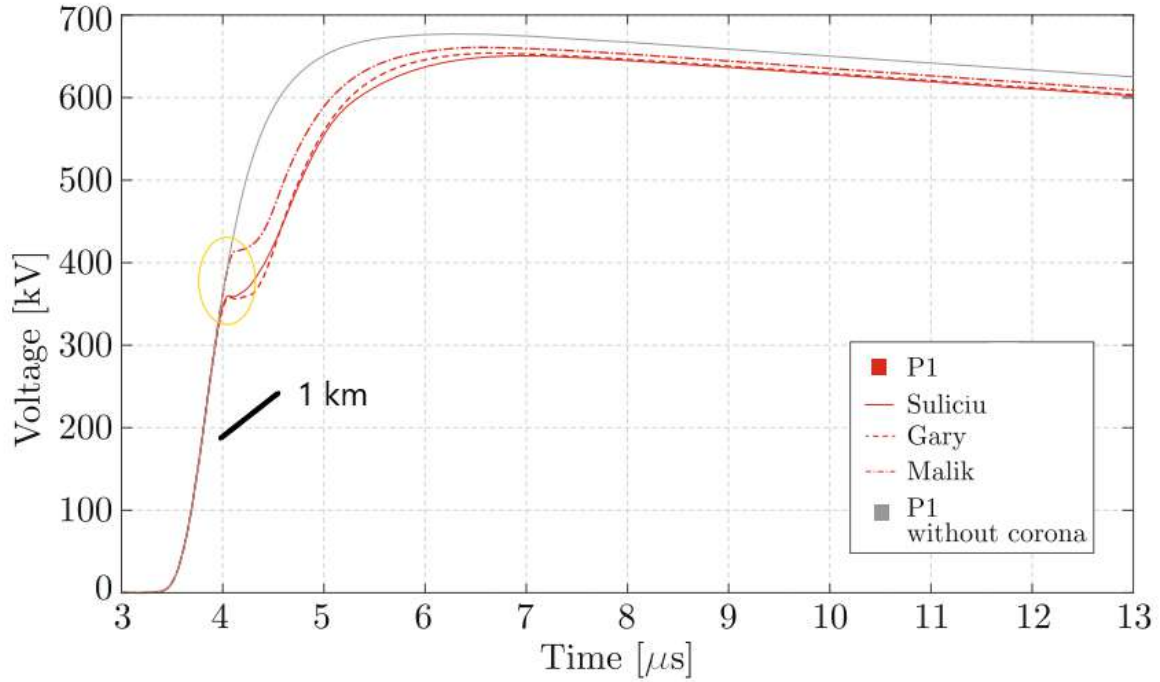
L'ensemble de ces résultats est obtenus sans prise en compte de l'effet couronne dans la ligne.

Le paragraphe suivant sera consacré pour la validation de notre concept en tenant compte de l'effet couronne. Nous comparons également deux modèles différents (modèle de Gary [III.1] et celui de Malik [III.2]) qui sont basés respectivement sur une approximation de *la non-linéarité du phénomène de la décharge couronne* ainsi que la prise en compte de comportement dynamique de l'effet couronne qui est simulé par une *augmentation apparente du rayon du conducteur r_0* .

IV.3. Cas de présence de l'effet couronne



a. Résultats de nos calculs.



b. Résultats publié [III.4].

Figure III.19. Tension sur le conducteur alimenté : Avec effet couronne.

Nous remarquons une bonne concordance entre nos résultats de calculs et celui publié en [III.4], les différents modèles pour la prise en compte de l'effet couronne conduisent à des résultats très proches ce qui conforte notre modélisation.

V. Etude paramétrique

Le but de cette application est de mettre en exergue l'effet des différents paramètres physiques (conductivité de sol, signal) et géométriques (hauteur et rayon de conducteur) sur la décharge couronne.

V.1. Effet de la conductivité du sol

❖ Modèle de Gary

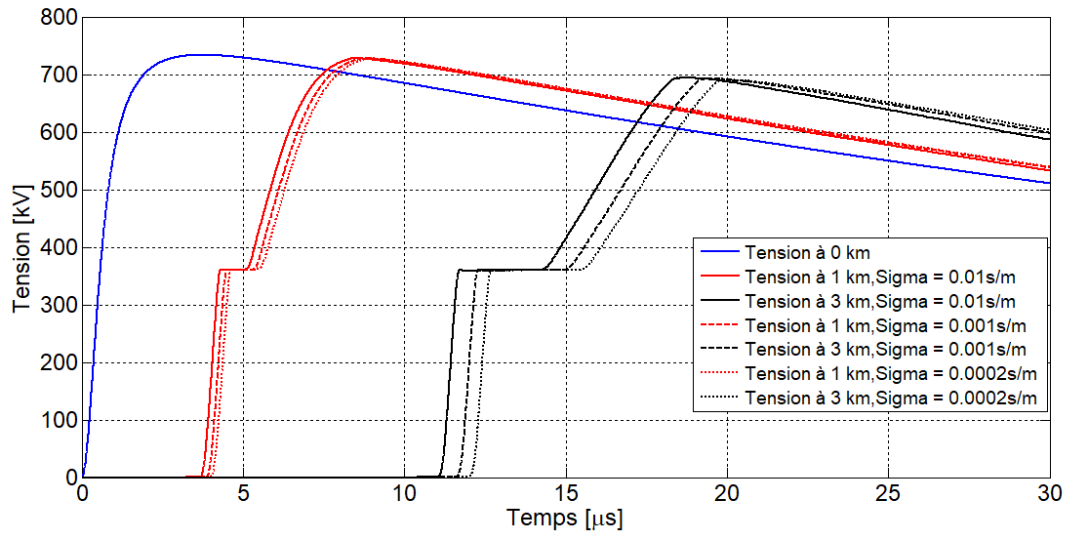


Figure III.20. Tension sur le conducteur alimenté : Modèle de Gary pour σ_{sol} variable.

❖ Modèle de Malik

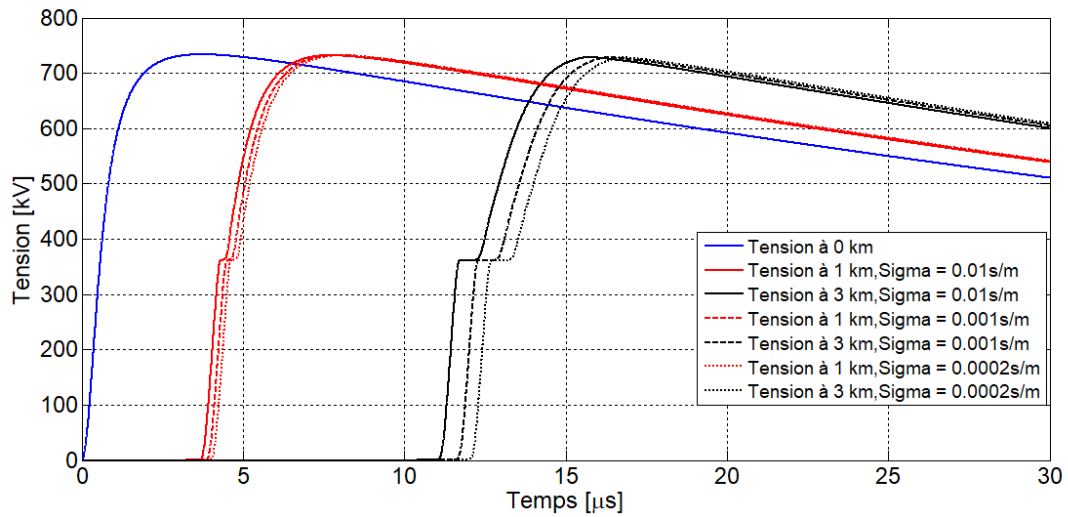


Figure III.21. Tension sur le conducteur alimenté : Modèle de Malik pour σ_{sol} variable.

V.2. Effet du rayon r_0

❖ Modèle de Gary

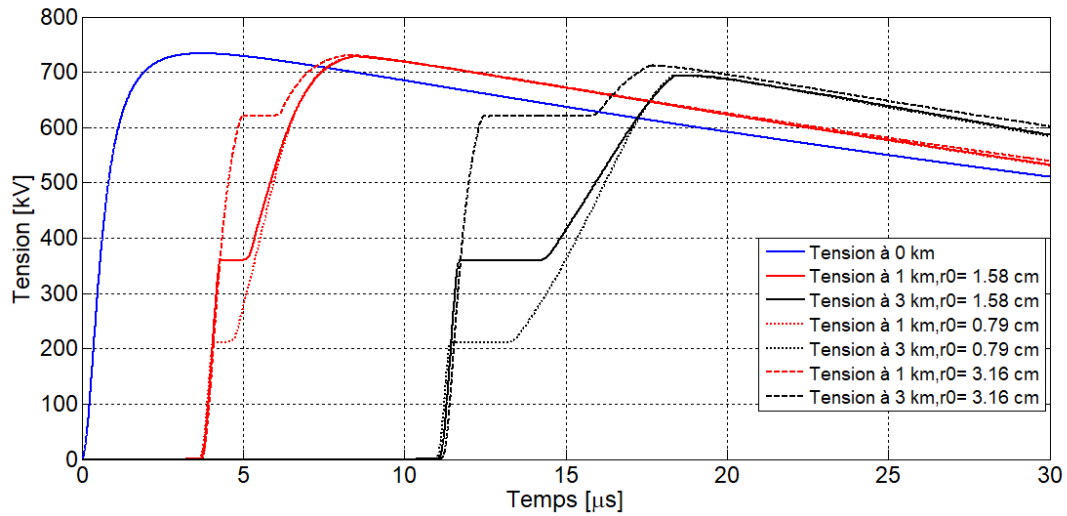


Figure III.22. Tension sur le conducteur alimenté : Modèle de Gary pour rayon variable.

❖ Modèle de Malik

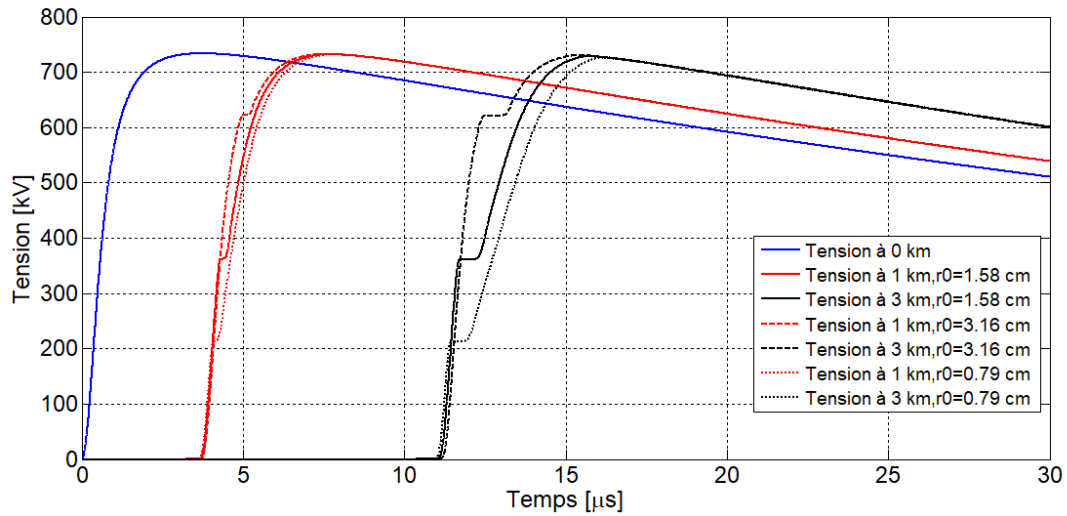


Figure III.23. Tension sur le conducteur alimenté : Modèle de Malik pour rayon variable.

V.3. Effet de la hauteur du conducteur au sol h

❖ Modèle de Gary

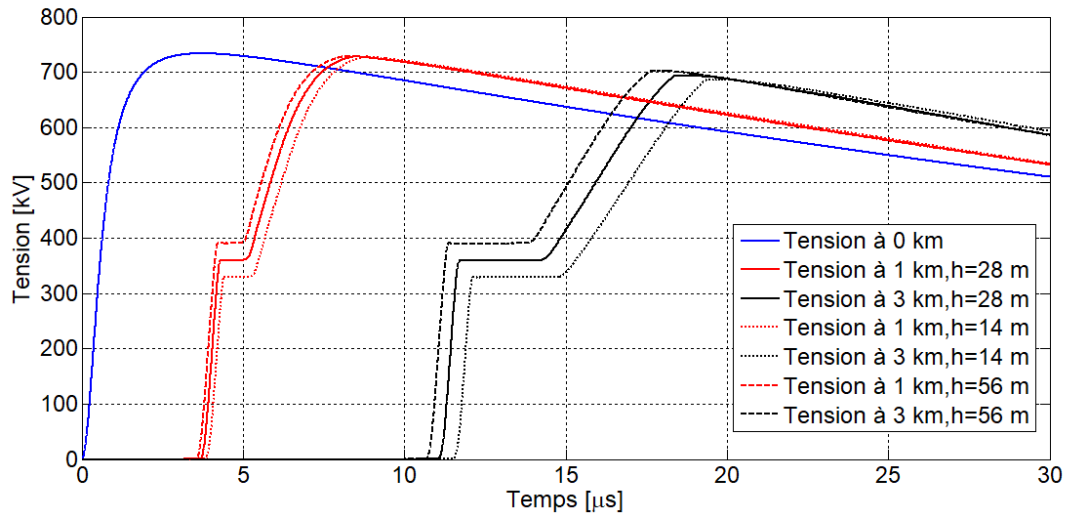


Figure III.24. Tension sur le conducteur alimenté : Modèle de Gary pour la hauteur variable.

❖ Modèle de Malik

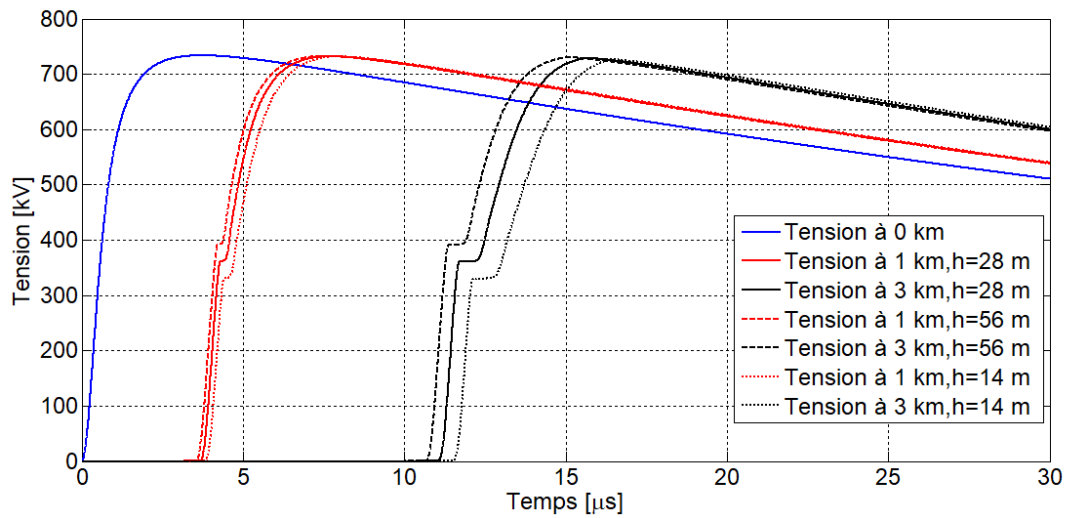


Figure III.25. Tension sur le conducteur alimenté : Modèle de Malik pour la hauteur variable.

V.4. Effet de front d'onde

❖ Modèle de Gary

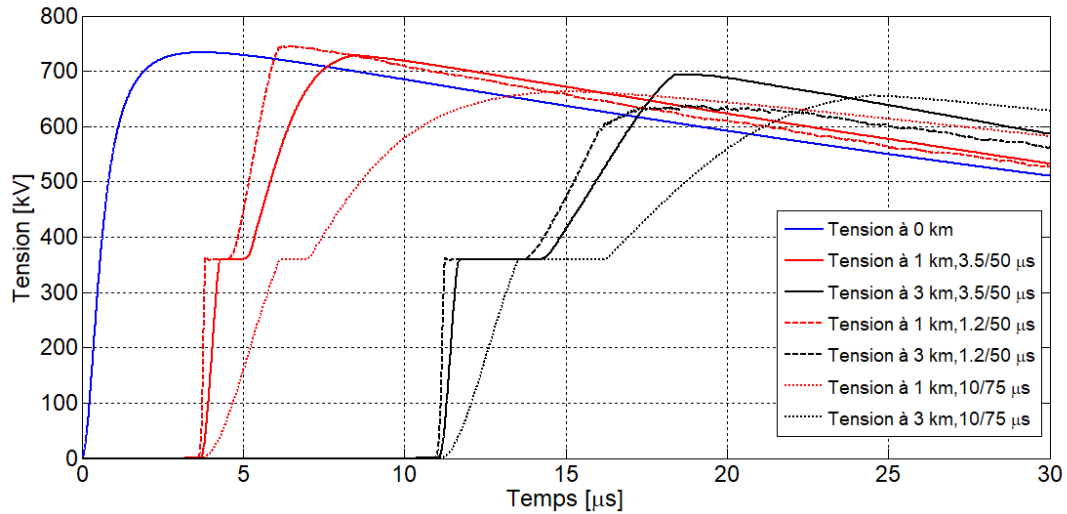


Figure III.26. Tension sur le conducteur alimenté : Modèle de Gary pour front d'onde variable.

❖ Modèle de Malik

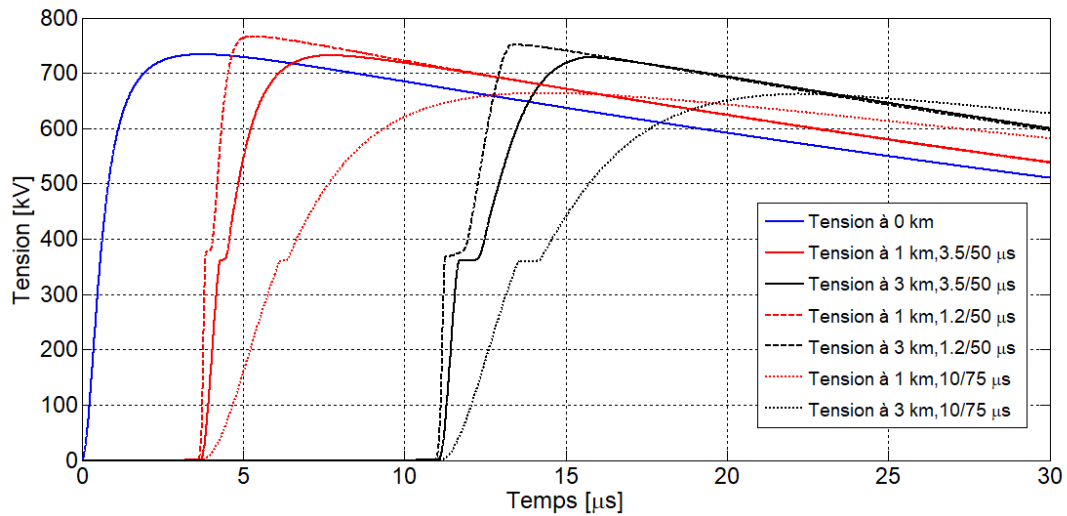


Figure III.27. Tension sur le conducteur alimenté : Modèle de Malik pour front d'onde variable.

VI. Analyse et discussion des résultats

Les résultats en figures III.20 à III.27 illustrent l'effet des différents paramètres physiques (Conductivité du sol et le front d'onde du signal) et géométriques (hauteur par rapport au sol et rayon du conducteur) sur l'effet couronne dans les lignes électriques. En effet, **la conductivité de sol σ_{sol}** a un effet certain sur les paramètres linéiques longitudinaux de la ligne (épaisseur de peau dans le sol), ce qui se manifeste par un léger retard de propagation avec la diminution de la conductivité du sol (figure III.20 pour le modèle de Gary [III.1] et figure III.21 pour le modèle de Malik [III.2]).

Le rayon de conducteur r_0 influe sur le champ électrique à la surface du conducteur (ce dernier est inversement proportionnel au rayon r_0) ce qui se répercute sur la tension critique de l'amorçage de l'effet couronne qui est proportionnelle au rayon de conducteur, cela est prévu théoriquement (expressions (I.1) et (I.3) chapitre I), nos résultats en figure III.22 obtenus par le modèle de Gary et figure III.23 par le modèle de Malik confirment ce concept théorique.

La hauteur de conducteur par rapport au sol h intervient également dans la tension critique d'amorçage de l'effet couronne et dans les paramètres linéiques longitudinaux et transversaux, en effet un conducteur plus proche du sol subit un amorçage pour une tension critique plus faible (figures III.24 et III.25).

Les figures III.26 et III.27 montrent que l'effet couronne est également lié à **la rapidité du signal d'excitation**, un signal plus rapide conduit à des surtensions plus importantes et inversement.

VII. Conclusion

Dans le but d'étudier l'effet couronne dans le réseau électrique, nous avons procédé par étapes complémentaires, dans un premier temps nous étudier le phénomène de la décharge couronne en calculant les coques de charges au tour du conducteur ainsi que leurs rayons et la capacité dynamique, l'ensemble des résultats que nous obtenu ont été validés par comparaison avec ceux publié [III.3] et nous signalons une très bonne concordance en allure et en ordre de grandeur.

En second, nous avons compléter notre étude en traçons la tension en différents point d'une ligne au-dessus du sol où nous avons aussi examiné l'effet des différents paramètres physique et géométriques sur la décharge couronne, la comparaison des différents modèles pour la prise en compte de l'effet couronne nous a permet de confirmer la validité de l'implémentation des concepts théoriques que nous avons utilisé. L'examen des différents paramètres à savoir la hauteur par rapport au sol, le rayon des conducteurs, la conductivité du sol ainsi que la rapidité du signal qui ont un effet plus ou moins important sur le phénomène de la décharge couronne nous a permet de confirmer certains aspect théoriques et de tirer quelques informations qui nous jugeons cruciales maitriser la coordination des isolements.

Références bibliographiques

[III.1] C. Gary, G. Dragan, D. Cristescu, "Attenuation of Travelling waves caused by Corona", CIGRE Report 33-13, 1978.

[III.2] Li, X.R., Malik, O.P., Zhao, Z.D.: A practical mathematical model of corona for calculation of transients on transmission lines. *IEEE Power Eng. Rev.* **9**(4), 75–75, 1989.

[III.3] Z. Anane, "Modèle dynamique de l'effet couronne pour l'étude de la propagation de la surtension le long des lignes de transmission HT en utilisant l'EMTP". Thèse de doctorat, Université Ferhat ABBAS-Sétif 1, 2019.

[III.4] Stracqualursi, E., Araneo, R., Andreotti, A.: The impact of different corona models on FD algorithms for the solution of multiconductor transmission lines equations. *High Volt.* **6**(5), 822–835, 2021. <https://doi.org/10.1049/hve2.12143>

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'effet couronne est un phénomène spécifique dans les réseaux électriques, qui peut être observé dans les lignes de transmission. Dans les réseaux HT, l'effet couronne est beaucoup plus significatif que dans les systèmes de BT. La modélisation de l'effet couronne dans les lignes de transmission est un domaine complexe et en constante évolution. Les études et recherches menées jusqu'à présent ont permis de mieux comprendre ce phénomène et son impact sur les réseaux électriques. Les modèles de circuit équivalent et les simulations numériques ont été développés pour évaluer les effets de l'effet couronne sur les performances des lignes de transmission.

Cependant, il reste encore des défis à relever dans la modélisation de l'effet couronne. Les caractéristiques non linéaires de l'effet couronne nécessitent des techniques d'analyse avancées pour être prises en compte de manière précise dans la conception des lignes de transmission. De plus, les interactions complexes entre l'effet couronne, les surtensions atmosphériques et d'autres phénomènes électromagnétiques doivent être étudiés plus en détail.

Malgré ces défis, la modélisation de l'effet couronne est essentielle pour évaluer les perturbations électriques, minimiser les pertes d'énergie et garantir la fiabilité et la sécurité des réseaux électriques. Des efforts continus de recherche et de développement sont nécessaires pour améliorer les modèles existants, intégrer les caractéristiques non linéaires de l'effet couronne et permettre une conception optimale des lignes de transmission.

Les chercheurs ont exploré différentes approches de modélisation, allant des modèles de circuiterie simples aux descriptions mathématiques plus avancées des caractéristiques « Q-V » (charge en fonction de la tension). Ces modèles permettent de mieux comprendre le comportement de l'effet couronne dans diverses conditions et configurations de lignes de transmission.

Dans notre mémoire de fin d'études qui s'inscrit dans le domaine des réseaux électriques nous avons abordé l'étude de la modélisation de l'effet couronne sur les lignes de transmission aérienne THT/HT et l'analyse de l'impact des différents paramètres géométriques et physiques sur le phénomène. Où en premier lieu nous avons confirmé que le modèle dynamique des coques couronne utilisés, donne des résultats pratiquement similaires et en bonne concordance avec ceux

publiées. En deuxième partie nous avons opté pour le choix d'un formalisme topologique $[A].[X]=[B]$ élaboré à partir du concept des lignes de transmissions et l'implémentation des modèles couronne par la méthode numérique dite FDTD. L'analyse des résultats que nous obtenons pour les applications traitées (modèles des coques couronne et de l'implémentation des modèles analytiques par FDTD), montrent que la théorie des lignes est bien adaptée pour le traitement de tel problème.

Notre étude paramétrique nous a permis d'affirmer que les paramètres géométriques « le rayon et la hauteur du conducteur par rapport au sol » ont une influence sur la tension critique d'amorçage et la forme d'onde qui se propage le long de la ligne de transmission.

En résumé, la modélisation de l'effet couronne dans les lignes de transmission est un domaine clé pour garantir l'efficacité (minimisation des pertes) et la fiabilité (réduction des surtensions) des réseaux électriques. Cela nécessite une collaboration étroite entre les chercheurs, les ingénieurs et les opérateurs du réseau afin de développer des modèles précis et d'appliquer les meilleures pratiques pour minimiser les effets néfastes de l'effet couronne.

Comme perspectives de ce travail, nous proposons :

- ***Développement de modèles avancés*** : Les perspectives futures incluent le développement de modèles avancés prenant en compte les paramètres environnementaux, les variations de tension et de fréquence, ainsi que les propriétés diélectriques des isolants.
- ***Étude des interactions avec d'autres phénomènes électromagnétiques*** : L'effet couronne peut interagir avec d'autres phénomènes électromagnétiques tels que les décharges partielles ou les transitoires électromagnétiques. Les perspectives futures consistent à étudier ces interactions pour mieux comprendre les effets cumulatifs et développer des solutions intégrées de gestion des phénomènes électriques indésirables.
- ***Optimisation de la conception des lignes de transmission*** : Les connaissances acquises grâce à la modélisation de l'effet couronne peuvent être utilisées pour optimiser la conception des lignes de transmission, en minimisant les pertes d'énergie, les surtensions et les interférences électromagnétiques. Cela contribuera à améliorer l'efficacité et la fiabilité du réseau électrique.

- ***Techniques de protection et de coordination*** : La mise au point de dispositifs de protection spécifiques contre l'effet couronne permettra de réduire les perturbations électriques, d'améliorer la fiabilité du réseau et de prolonger la durée de vie des équipements.

En résumé, les perspectives sur l'effet couronne dans le réseau électrique mettent en évidence l'importance de la recherche continue, de l'innovation technologique et de la collaboration entre les acteurs de l'industrie pour améliorer la fiabilité, la sécurité et l'efficacité des réseaux électriques à l'avenir.